

# **AALTOVOIMALAITTEISTON PM GENERAATORIN JA TASASUUNTAUKSEN MALLINTAMINEN JA TESTAUS**

Henri Toijala

Opinnäytetyö  
Toukokuu 2011  
Sähkötekniikan koulutusohjelma  
Sähkövoimatekniikan suuntautumisvaihtoehto  
Tampereen ammattikorkeakoulu

**TAMPEREEN AMMATTIKORKEAKOULU**  
Tampere University of Applied Sciences

## TIIVISTELMÄ

Tampereen ammattikorkeakoulu  
Sähkötekniikan koulutusohjelma  
Sähkövoimatekniikan suuntautumisvaihtoehto

TOIJALA, HENRI: Aaltovoimalaitteiston PM generaattorin ja tasasuuntauksen mallintaminen ja testaus

Opinnäytetyö 61s., liitteet 23s.  
Toukokuu 2011

---

Tämän työn tarkoituksena oli tutkia kestopagneettigeneraattorin toimintaa aaltovoimatuotannossa. Aaltovoimassa ongelmana sähköntuotannon kannalta on alati muuttuva generaattorin kierrosnopeus, joka aiheuttaa jatkuvan jännitteen, virran, taajuuden ja tehon muuttumisen. Työssä oli tarkoitus tutkia erään generaattorin kuormitettavuutta ja tehontuottoa eri kierrosnopeuksilla sekä pyrkiä määrittämään yhtälöt kuorman optimoimiseksi maksimaalisen tehotuoton saavuttamiseksi.

Aluksi oli suunniteltava ja toteutettava mekaaninen kytkentä generaattorin ja aaltovoimalan toimintaa mallintavan servomoottorikäytön välille laboratoriotutkimuksia varten. Työssä valittiin käyttöön sopiva alennusvaihe sekä suunniteltiin vaihteen ja generaattorin kiinnittämiseen vaaditut tuet sekä valittiin kytkimet komponenttien välille.

Kun laboratoriokytkentä oli valmis, aloitettiin kuormitusmittausten tekeminen eri kierrosnopeuksilla. Kuormina käytettiin puhdasta resistiivistä kuormaa, tasasuunnattua resistiivistä kuormaa sekä molempia edellä mainittuja kytkentöjä kondensaattorit kuorman rinnalle lisättyinä. Tuloksena syntyivät tehokäyrät generaattorin vaihejännitteen sekä kuormitusresistanssin funktiona. Näitä käyriä verrattiin valmistajan ilmoittamiin tietoihin ja todettiin tulosten poikkeavan toisistaan. Syytä tiedusteltiin valmistajalta ja kävi ilmi, että generaattori oli räätälöity tiettyä käyttötarkoitusta varten, mistä johtuen arvot poikkesivat ilmoitetuista.

Eri kierrosnopeuksilla suoritettujen tehokäyrämittausten perusteella määritettiin optimikuormitukset kierrosnopeuden funktiona maksimaalisen tehon tuottamiseksi kaikilla kierrosnopeuksilla. Tuloksena syntyivät lineaariset yhtälöt eri tutkimuskytkentöjä varten. Tämän jälkeen suoritettiin puhtaasti resistiivisellä kuormalla mittaukset muuttuvaa kierrosnopeutta käyttäen kahdella erilaisella aaltoprofiililla.

Kaikkien mittausten rinnalla suoritettiin samat asiat simulaatiomallilla, jonka parametrit määritettiin mitattujen arvojen ja eri arvojen kokeilun avulla. Simulaatiomallin parametrit poikkesivat todellisista, koska malli ei osannut huomioida kaikkia generaattorin todellisia ominaisuuksia. Tärkeintä oli kuitenkin se, että mallin toiminta saatiin vastamaan todellisen piirin toimintaa.

---

Asiasanat: Aaltovoima, kestopagneettigeneraattori, ASWEC

## ABSTRACT

Tampereen ammattikorkeakoulu  
Tampere University of Applied Sciences  
Degree Programme in Electrical Engineering  
Option of Electrical Power Engineering

TOIJALA, HENRI: Wave energy system's PM generator and rectifier simulation and testing

Bachelor's thesis 61 pages, appendices 23 pages  
May 2011

---

The purpose of this thesis was to research how permanent magnet generator works in wave energy production. The problem in wave energy from electrical production point of view is the changing rotation speed of the generator caused by constantly changing waves. Voltages, currents, frequency and power are changing all time because of that. One of the main goals was to investigate the loadability and power production of specific generator with different rotation speeds and to determine the formulas for the optimal load resistance to generate the maximum power at any rotation speed.

The project began with designing of the mechanical connection between the generator and the servo drive simulating wave energy converter. The gear between generator and servo drive was chosen together with axle connectors. Also the supports for generator and gear were designed.

When the mechanical construction was ready began the making of measurements with different rotation speeds. Used loads were pure resistive load, rectified resistive load and both previous connections with capacitance added parallel to load. As a result the power curves in function of phase voltage and load resistance were born. These curves were compared to information given by manufacturer and there were notable differences. Manufacturer was contacted according to differences and the reason seemed to be that generator was tailored for a specific use with internal values differing from the ones manufacturer gave.

Based on the measurements with different rotation speeds the optimal loads were determined in function of rotation speed to get the maximal output power at any speed. As a result linear functions for different connections were born. Next thing was to do measurements with two different wave profiles using pure resistive load.

Along with all the measurements same things were done in simulation model which parameters were determined by using some measured values and some values that were found simply by testing. Simulation parameters were different from the measured values because the model was not able to simulate all the internal functions of generator. At the end most important thing was that model was acting like a real generator.

---

Key words: Wave energy, permanent magnet generator, ASWEC

## SISÄLTÖ

1	JOHDANTO .....	5
2	AALTOVOIMA.....	6
2.1	Lyhyt katsaus aaltovoiman historiaan.....	6
2.2	Energiaa aalloista .....	7
2.3	Aaltovoiman haasteet .....	13
3	AKSIAALIVUOKESTOMAGNEETTIKONE.....	15
3.1	Rakenne.....	15
3.2	Toimintaperiaate ja ominaisuudet .....	16
3.3	Sisäisten arvojen määrittäminen .....	17
3.4	Magnetoinnin kasvattaminen kapasitanssilla.....	21
4	SIMULAATIOMALLI .....	24
5	TUTKIMUKSET LABORATORIOSSA .....	26
5.1	Laitteiston tekniset tiedot .....	26
5.1.1	Generaattori.....	26
5.1.2	Servomoottorikäyttö.....	26
5.2	Generaattori osana tutkimuslaitteistoa .....	27
5.2.1	Vaihteen valinta .....	27
5.2.2	Vaihteen ja generaattorin kiinnitys servokäyttöön.....	29
5.3	Mittaukset.....	30
5.3.1	Staattorikämmiresistanssit .....	30
5.3.2	Tyhjäkäyntimittaus.....	30
5.3.3	Kuormitusmittaus resistiivisellä kuormalla .....	33
5.3.4	Kuormitusmittaus tasasuuntaussiltaa ja resistiivistä kuormaa käyttäen..	37
5.3.5	Kompensointikondensaattorin mitoitus ja kuormituskoee .....	38
5.4	Kuormituksen optimointi eri kierrosnopeuksilla .....	46
6	SIMULAATIOMALLIN ASETTELU .....	50
7	KOKEET MUUTTUVALLA KIERROSNOPEUDELLA .....	53
7.1	Pienet aallot.....	53
7.2	Suuret aallot .....	54
7.3	Aktiivisesti ohjattu kuorma muuttuvalla nopeudella .....	57
8	JOHTOPÄÄTÖKSET JA POHDINTA.....	59
	LÄHTEET.....	61
	LIITTEET.....	62

## 1 JOHDANTO

Tampereen ammattikorkeakoulussa on jo muutaman vuoden ajan viety eteenpäin projektia, jonka tavoitteena on tutkia aaltovoimaa ja aaltovoimalan kehittämistä. Keväällä 2009 belgialainen vaihto-opiskelija tutki generaattorivaihtoehtoja sekä tasasuuntaussil-  
lan ominaisuuksia. Syksyllä 2010 espanjalainen vaihto-opiskelija jatkoi tästä DC-  
välipiirin komponenttien mitoittamisella. Yhtäaikaisesti tämän työn kanssa toinen bel-  
gialainen vaihto-opiskelija tutki DC-välipiirin toimintaa ja jännitteen tasaamista mm.  
boost-hakurilla.

Tämän työn aiheena oli olemassa olevan kestopagneettitahtigeneraattoria mallintavan  
Matlab-mallin tutkiminen yhdessä laboratorioon rakennettavan generaattorikytkennän  
kanssa. Yhtenä tavoitteena oli laboratoriokokeiden avulla määrittää generaattorin tär-  
keimpiä sähköisiä arvoja vastaavat parametrit, jotta simulaatiomalli saatiin toimimaan  
oikein ja vastaamaan todellista generaattoria.

Työssä perehdytään kestopagneettitahtigeneraattorin kuormitettavuuteen resistiivisellä  
kuormalla sekä tasasuunnatulla resistiivisellä kuormalla. Lisäksi tutkitaan kapasitanssin  
vaikutusta generaattorin pätötehoon. Tarkoituksena on määrittää minkälaisella kuormal-  
la generaattorista saadaan maksimaalinen tehontuotto. Koska aaltovoimalan generaatto-  
rin kierrosnopeus on aalloista johtuen jatkuvan muutoksen alaisena, on työssä perehdyt-  
ty myös muuttuvanopeuksisen käytön tutkimiseen.

## 2 AALTOVOIMA

### 2.1 Lyhyt katsaus aaltovoiman historiaan

Aaltovoima on yksi käytettävissä olevista uusiutuvan energian muodoista. Vanhimmat aaltovoiman käyttämiseen liittyvät patentit ovat vuodelta 1799, mutta nykymuodossaan aaltovoimaa on tutkittu 1970-luvun alkupuolelta lähtien. Alkusysäyksen nykyiselle aaltovoimatutkimukselle antoi Edinburghin yliopiston professori Stephen Salterin Nature-lehdessä julkaisema artikkeli vuonna 1974. Salterin esittämiä teorioita ja pidettiin vastuksena 70-luvun öljykriisin. Aaltoenergia ei kuitenkaan lyönyt tuolloin itseään läpi, sillä silloisen aaltoenergian kehityksen kärkimaan, Ison-Britannian, hallitus päätti kohdistaa rahoituksensa vain suurin, yli 2 GW, yksiköihin. Asiantuntijat ja tutkijat totesivat kuitenkin, että näin suuria yksiköitä ei olisi taloudellisesti järkevää rakentaa, vaan tulisi keskittyä pienempiin, muutaman megawatin yksiköihin. (Cruz 2008, 2.)

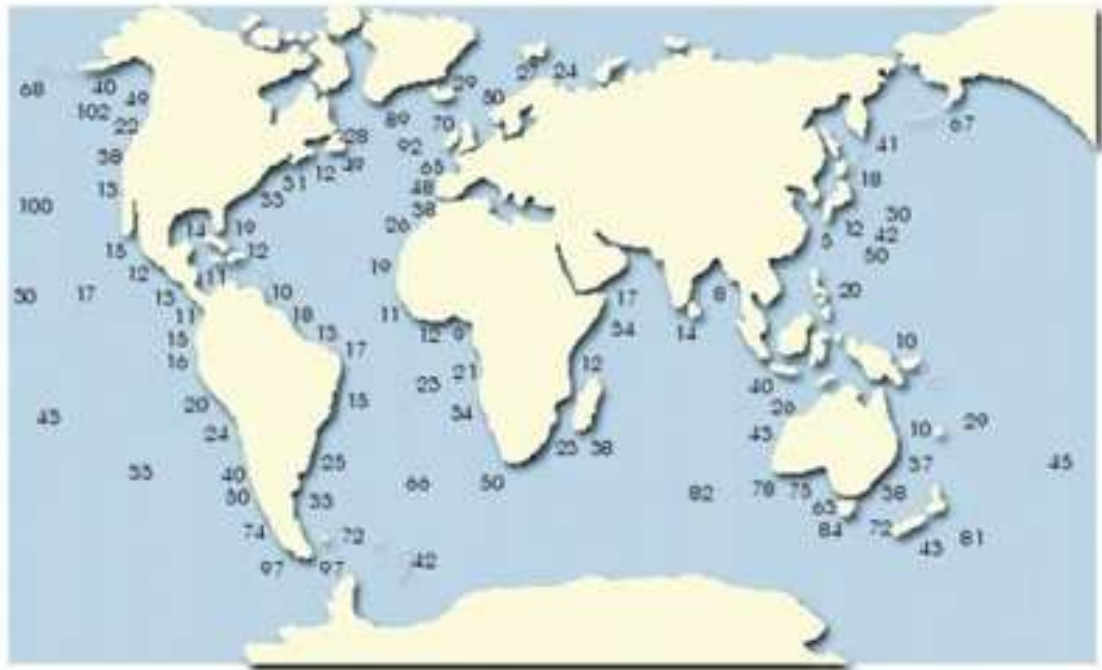
80-luvun alussa Iso-Britanniassa alkoi hallituksen tukema tutkimus ja kehitysohjelma pienempitehoisten ja hyötysuhteeltaan parempien voimaloiden kehittämiseksi. Näissä tutkimuksissa saatiinkin lupaavia tuloksia etenkin rannalle sijoitettavien OWC-tyyppisten voimaloiden osalta. Silloisetkin mallit todettiin kuitenkin liian epätaloudelliseksi. (Thorpe 1999, 1.)

90-luvun loppupuolelle tultaessa alkoi ympäri maailmaa olemaan vireillä kymmeniä erilaisia aaltovoiman tutkimusprojekteja. Vuonna 1999 tehdyn tutkimuksen mukaan aaltovoiman tuotantokustannukset olivat noin 6 senttiä kilowattituntia kohti. Tämä merkitsi sitä, että aaltovoima alkoi olla lähellä rajapyykkiä, minkä jälkeen tuotanto muuttuisi kannattavaksi. (Thorpe 1999, 1.)

Tällä hetkellä vireillä on edelleen kymmeniä erilaisia aaltovoiman tutkimusprojekteja ja on mahdollista, että joku valmistaja voi hyvin saada mallinsa valmiiksi kaupallista käyttöä varten hyvinkin pian. Se olisi ainakin toivottavaa kehitystä, sillä kiistatta voi todeta aaltojen sisältävän hyvin paljon puhdasta energiaa.

## 2.2 Energiaa aalloista

Aaltoenergia on pohjimmiltaan peräisin auringosta. Kun aurinko lämmittää ilmassa, syntyy tuulia. Tuulet puolestaan synnyttävät aaltoja. Mitä pidemmällä matkalla tuuli pääsee esteettömästi vaikuttamaan, sitä suurempia aalloista tulee. (World Energy Council 2010, 562.) Aaltojen tehoa kuvataan yksiköllä kW/m, mikä tarkoittaa tehoa, joka saadaan metrin levyisestä aaltorintamasta. Kuviossa 1 on nähtävissä vuoden keskimääräiset aaltorintamatehot maailman merillä.



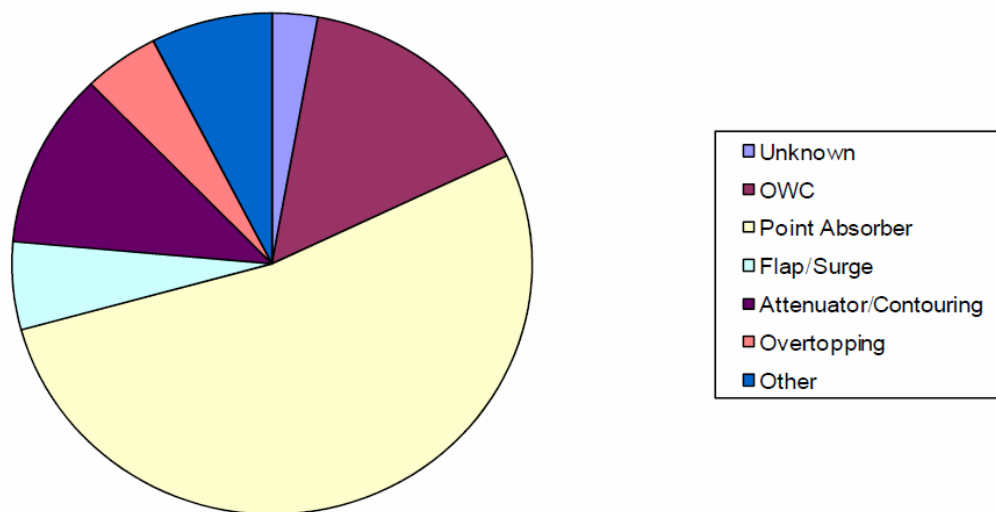
KUVIO 1. Vuoden keskimääräisiä aaltorintamatehoja maailman merissä [kW/m] (Pelamis Wave Power 2011)

Kuviosta 1 voidaan nähdä parhaimpien aaltorintamatehojen keskittyvän suurten merien rannoille. Euroopassa otollisimpia alueita kartan mukaan ovat Britteinsaarten, sekä Espanjan, Portugalin ja Norjan rannikot. Kartan perusteella ymmärtää helposti, miksi aaltovoimaosaaminen Euroopassa on keskittynyt erityisesti Iso-Britanniaan. Myös Portugalin rannikon suosiminen testauskohteena on kartan perusteella hyvin järkevää.

Koko maailman syvissä merissä (yli 100 m syvää) arvioidaan vuositasolla olevan 8000 – 80000 TWh energiaa. Verrattaessa sitä koko maailman sähköntuotantoon vuonna 2007, joka oli 19 855 TWh, voidaan todeta merissä piilevän todella merkittävän energi-

anlähteen. On kuitenkin huomioitava, että taloudellisesti hyödynnettävissä olevan aaltoenergian arvioidaan tällä hetkellä olevan tasolla n. 140 – 750 TWh vuodessa. On kuitenkin esitetty arvioita, joiden mukaan järkevästi hyödynnettävissä olevan aaltoenergian määrä voisi nousta 2000 TWh:in vuodessa, mikäli osattaisiin kehittää nykyiset voimalat äärimmäiselle tasolleen. (World Energy Council 2010, 563.)

Aaltoenergiaa voidaan hyödyntää monella eri periaatteella. Tästä kertoo paljon se, että World Energy Councilin mukaan maailmalla on vähintään sata erilaiseen teknologiaan perustuvaa aaltovoimalaprojektia (World Energy Council 2010, 566). Kaaviossa 1 on nähtävissä miten aaltovoimaprojektit jakautuvat tärkeimpien teknologioiden kesken. Kyseiset teknologiat on esitelty lyhyesti jäljempänä.



KAAVIO 1. Aaltovoiman tuottamiseen käytettävät teknologiat (World Energy Council 2010, 566)

Kuten yllä olevasta kuviosta nähdään, pohjautuu ehdoton enemmistö teknologioista point absorber, eli poiijuteknologiaan. Toiseksi eniten käytetään OWC, eli Oscillating Water Columnia. Poiijuteknologian suosio perustuu varmasti hyvin pitkälti edulliseen ja suhteellisen yksinkertaiseen rakenteeseen.

#### Point absorber - poiijuteknologia

Poiijuteknologia perustuu vedenpinnalla olevan kelluvan tai lähellä vedenpintaa olevan kappaleen edestakaiseen pystysuuntaiseen liikkeeseen, joka syntyy aallon kulkiessa

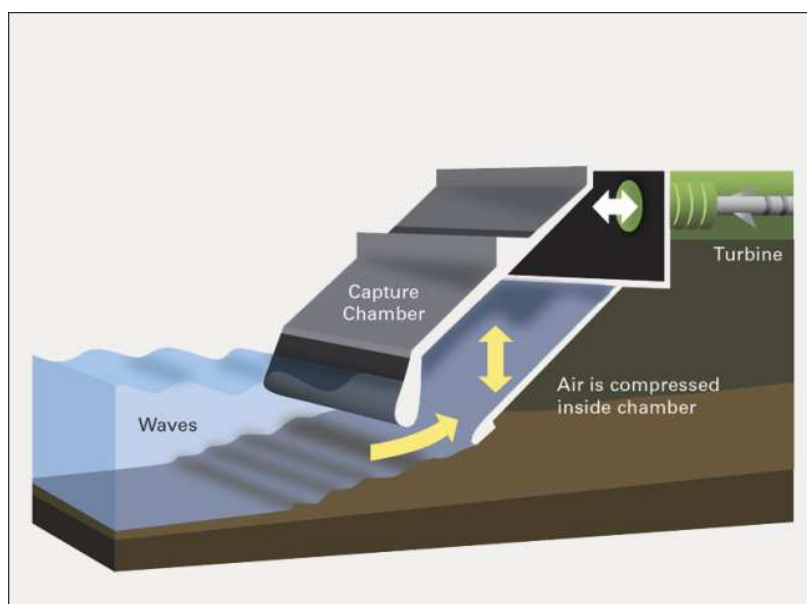


poijun ohi. Poiju on kytketty vaijerin tai köyden välityksellä pohjaan ankkuroituun generaattoriosaan. Generaattorina voi olla lineaarigeneraattori, tai kuten tässä tutkintotyössäni tutkimassani projektissa mekaanisen tasasuuntaajan välityksellä yhteen suuntaan pyörivä generaattori. Eräissä projekteissa poiju on kytketty hydrauliseen järjestelmään, jolla generaattoria käytetään. (World Energy Council 2010, 567.)

Poijuteknologian heikkoutena on varsin rajallinen asennussyvyys, koska poijun on oltava veden pinnalla tai ainakin pinnan tuntumassa generaattoriosan ollessa tyypillisesti pohjaan ankkuroituna. Pinnalla oleva poiju on myös hyvin altis myrskyille. Toisaalta poijun kenties suurin etu on se, että se kykenee luonnostaan hyödyntämään eri suuntiin liikkuvat aallot ilman säätötoimenpiteitä.

### OWC – Oscillating Water Column

OWC on yleensä rantaan asennettu puoliksi veden alla oleva kammio, jota vasten lyövä aalto aiheuttaa kammioon ilmanpaineen kasvua. Paine pääsee purkautumaan aukon kautta tuuliturbiiniin, joka on kytketty generaattoriin. Aallon vetäytyessä syntyy kammioon alipaine, joka imee ilmaa turbiinin kautta. Turbiinina käytetään joko Wells turbiinia, jonka lavat on muotoiltu siten, että pyörimissuunta on aina sama riippumatta ilmavirran suunnasta. On myös mahdollista käyttää ohjattavalla lapakulmalla varustettua turbiinia, jonka avulla pyörimissuunta saadaan säilytettyä samana molempien vaiheiden aikana. (Cruz 2008, 199–205.) Periaatekuva toiminnasta on esitetty kuviossa 2.



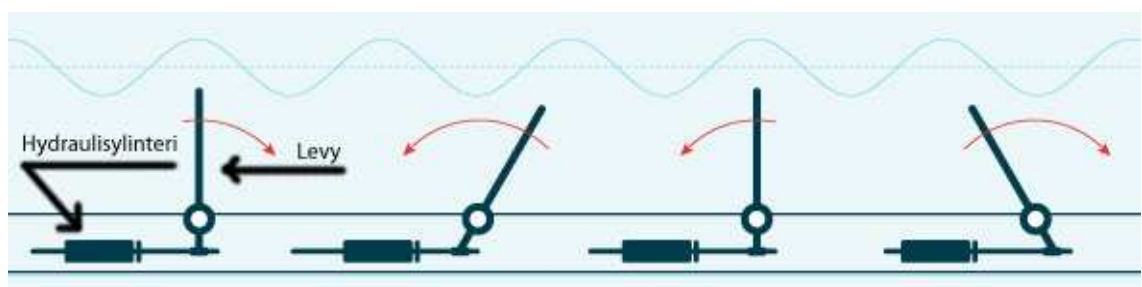
KUVIO 2. OWC toimintaperiaate (Wavegen 2010)

OWC voi sijaita myös avomerellä, mutta tällöin toimintaperiaate on hieman erilainen perustuen kuitenkin samaan ilmiöön. Avomeri OWC perustuu kelluvaan kammioon, jonka sisällä paine muuttuu aaltojen vaikutuksesta aiheuttaen ilmavirtauksen turbiinin läpi.

Rantalinjaan sijoitettu OWC on helppo ja edullinen rakentaa verrattuna meren pohjaan perustettaviin rakenteisiin. OWC voimalat ovat myös luotettavia toiminnan yksinkertaisuudesta johtuen (World Energy Council 2010, 566). Toisaalta rantaan asennettu OWC voi olla melko äänekäs kammiorakenteesta johtuen syntyvien voimakkaiden ilmavirtojen vuoksi. Ranta-asennuksessa ongelmana on myös laskuvesi, jonka aikana aallot eivät luonnollisesti ylety iskemään voimalaan saakka.

### Flap / Surge

Tämä teknologia hyödyntää veden vaakasuuntaista liikettä (World Energy Council 2010, 568). Käytännössä näiden laitteiden on siis sijaittava rannan läheisyydessä, tai matalikolla, missä vesipartikkelit eivät mahdu enää liikkumaan pystysuunnassa, vaan alkavat liikkua vahvasti elliptistä rataa. Pääosin energian keräämiseen käytetään toisesta päästään nivellettyjä levyjä, jotka heiluvat edestakaisin pohjakasvien tavoin (kuvio 3). Syntynyt liike-energia muunnetaan sylinterillä hydrauliseksi paineeksi, jolla käytetään generaattoria. (World Energy Council 2010, 568–569.)



KUVIO 3. Flap / Surge-tyyppisen voimalan toimintaperiaate (AW-Energy 2010, muokattu)

Tämän teknologian suurin etu on pohja-asennuksesta johtuva näkymättömyys pinnalle. Täten voimalat eivät ”pilaa maisemaa” ja riittävän syvälle ja oikeaan paikkaan asennettuina eivät myöskään ole haitaksi meriliikenteelle. Tällaisia voimaloita voidaan valmis-

taa moduulirakenteella, jolloin on helppo yhdistää monta yksikköä suureksi kokonaisuudeksi (AW-Energy 2010).

#### Attenuator/Contouring

Tämä teknologia perustuu aallon kulkusuuntaisesti pinnalle asennettuihin pitkiin nivellettyihin putkirakenteisiin. Nivelten yhteydessä on hydrauliset pumpput, jotka muuttavat nivelten taipuessa syntyvän voiman paineeksi, jolla käytetään generaattoria (Kuva 1). Toinen käytetty tekniikka perustuu nesteellä täytettyyn pitkään jäykästä tai joustavasta materiaalista valmistettuun putkirakenteeseen. Putken keinuessa aallon mukana neste virtaa edestakaisin synnyttäen painetta, jolla käytetään generaattoria. (World Energy Council 2010, 569.)



KUVA 1. Pelamis prototyyppi voimala toiminnassa Skotlannin rannikolla (Pelamis Wave Power 2007)

Tämän teknologian etuna, etenkin nesteen virtaamaan jäykässä putkessa perustuvissa järjestelmissä, on se, että putkena voidaan käyttää esimerkiksi vanhaa laivaa, jonka sisälle virtausjärjestelmä on rakennettu. Toisaalta tällaisen voimalan paikka on mietittävä melko tarkkaan, koska voimala toimii vain kun aalto ohittaa sen pituussuunnassa. Näiden voimaloiden on oltava melko pitkiä, joten kääntäminen kulloinkin vallitsevien aalto-olosuhteiden mukaiseksi on vaikeaa tai jopa mahdotonta. Siksi paikka on valittava sellaiseksi, että aaltojen suunta säilyy mahdollisimman samana ympäri vuoden.

## Overtopping

Viides yleinen teknologia aaltovoiman tuotannossa on ns. overtopping-tekniikka. Tekniikka perustuu rannalla olevaan, tai avomerellä kelluvaan altaaseen, jonka reuna on viistetty luiskaksi siten, että aalto lyö sitä vasten ja sisältämänsä liike-energian turvin nousee luiskaa pitkin ylös valuen altaaseen. Altaan pohjalla on reikä, josta vesi johdetaan takaisin mereen. Tämän reiän yhteydessä on turbiini, jolla pyöritetään generaattoria. (World Energy Council 2010, 569-570.)

Edellä esiteltiin lyhyesti viisi yleisintä aaltovoimalateknologiaa. Näiden lisäksi, kuten kaaviosta 1 nähdään, on tutkimuksen kohteena vielä lisää erilaisia vähemmän tunnettuja tekniikoita. Yhteenvetona eri aaltovoimalatekniikoista voi todeta, että tutkimuksen kohteena on hyvin erilaisia tekniikoita. Erilaisten tekniikoiden kehittyessä on tulevaisuudessa varmasti helpompaa valita eri projekteihin laitteisto, joka toimii parhaiten tarjolla olevissa olosuhteissa. Sähköisessä mielessä erilaiset toimintaperiaatteet eivät välttämättä ole niin merkityksellisiä, koska aaltoenergia, tuotettiinpa se tavalla tai toisella, on lähes aina luonteeltaan sykkivää.

Taulukossa 1 on esitetty World Energy Councilin vuoden 2010 raportissa ilmoitettujen aaltovoimaprojektien määrä kehitysasteen mukaan jaoteltuna (World Energy Council 2010, 564–565). Taulukosta voidaan päätellä, että erilaisissa testivaiheissa on todella paljon erilaisia aaltovoimalatyyppejä. Se miten paljon allas- ja pienoismallikokeissa karsiutuu kannattamattomia malleja on vaikea arvioida, mutta täyden mittakaavan koevaiheeseen asti edenneiden mallien voisi olettaa olevan hyvin lähellä kaupallista läpimurtoa. Kaupallisen käyttöön on toistaiseksi edennyt vain kuvassa 1 esiintyvä Pelamis Wave Powerin malli (World Energy Council 2010, 565).

TAULUKKO 1. Aaltovoimaprojektien kehitysasteet tammikuussa 2010

Kehitysaste	Määrä
	kpl
Teoriatasolla	18
Allaskokeissa	32
Pienoismallikokeet merellä	29
Täyden mittakaavan kokeet	24
Kaupallisessa käytössä	1
Tuntematon	1
Yhteensä	105

### 2.3 Aaltovoiman haasteet

Aaltovoiman tuotannossa on vielä monia suuria haasteita voitettavana, ennen kuin suuren mittakaavan tuotanto on mahdollista. Toistaiseksi merelle rakentaminen on hyvin kallista, varsinkin jos voimalalle on rakennettava kiinteät perustukset meren pohjaan. Rakenteiden on myös oltava niin järeitä, että ne kestävät suurimmatkin aallot rikkoon-tumatta.

Monilla hyvien aalto-olosuhteiden alueilla voi kuvion 1 perusteella päätellä vaikuttavan kylmien talviolosuhteiden. Jäätyminen on suuri riski voimaloille, koska yhtenäinen jää-peite voi viedä pintarakenteet mennessään. Alueilla, joissa merivesi jäähtyy todella kylmäksi, mutta ei esimerkiksi aalto-olosuhteiden vuoksi jäädy lainkaan, voi kiinteiden kappaleiden ympärille alkaa kertyä jäätä, mikä aiheuttaa vaurioita laitteistoille. Näin ollen alueilla, joilla vaikuttaa jäätalvi, on voimaloiden pintarakenteet poistettava talven ajaksi. Tämä syö ison osan energiantuotannon kannattavuudesta, joten luultavasti talvel-la jäätyville alueille ei ole järkevää sijoittaa voimaloita.

Vaikka aaltovoima ei itsessään aiheuta ilmastopäästöjä ja ei siten edistä kasvihuoneil-miötä, on aaltovoimallakin tietynlaisia ympäristövaikutuksia. On tärkeää että voimaloita perustettaessa selvitetään syntyvät ympäristövaikutukset aivan kuten kaikkien muiden-kin suurten rakennushankkeiden kohdalla. Aaltovoimaloista syntyy samankaltaisia ym-päristövaikutuksia kuin merituulivoimaloista. Tällaisia ympäristövaikutuksia ovat lähinnä melu ja mahdollinen veden samentuminen. Meluhaittojen huomiointia ei tule raja-ta ainoastaan ilmaan johtuviin, vaan myös veden alle kantautuviin. Veden alla syntyvä melu voi vaikuttaa alueen vesieliökantoihin. Esimerkiksi Isossa-Britanniassa ympäristö-

vaikutuksiin on kiinnitetty huomiota ympäristöhallinnon puolelta ja uusille hankkeille onkin suoritettava sikäläinen täydellinen ympäristövaikutusten arviointiprosessi (Cruz 2008, 399).

Koska aaltovoimalle otolliset paikat ovat usein matalikoilla ja niiden reunoilla, on mahdollista syntyä myös ristiriitoja paikallisten elinkeinojen kanssa, erityisesti kalastajien keskuudessa suuret aaltovoimalaprojektit voivat herättää vastarintaa. Alueiden käytöstä voi syntyä ristiriitoja myös muiden käyttäjien kesken, kuten esimerkiksi kaivosalan toimijoiden, kaasu- ja sähköoperaattoreiden sekä vesiliikenteen toimijoiden. (Cruz 2008, 413).

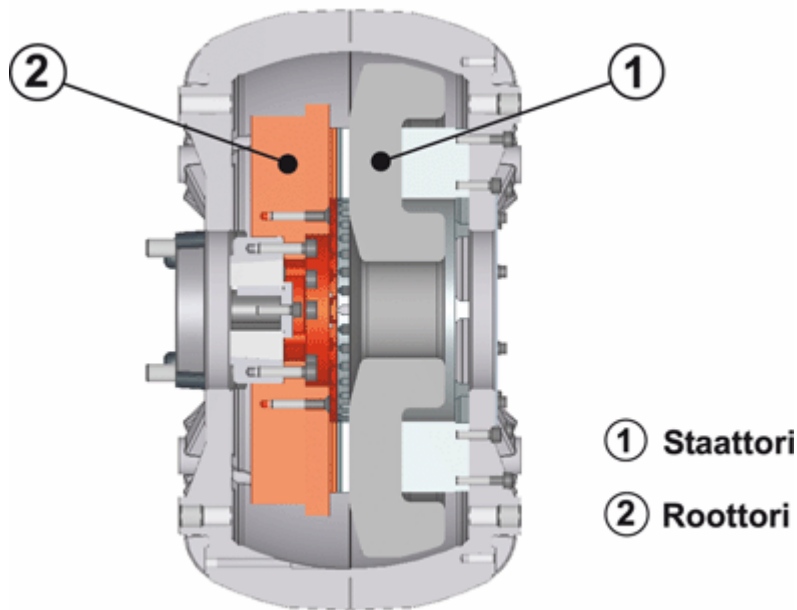
### 3 AKSIAALIVUOKESTOMAGNEETTIKONE

Kestomagneettikoneiden tutkimus on viimeaikoina voimistunut huomattavasti. Siitä huolimatta, että kyseinen konetyyppi oli yksi ensimmäisiä keksittyjä pyörivien sähkökoneiden tyyppejä, ei se saavuttanut suosiota mm. heikkojen magneettimateriaalien vuoksi (Parviainen 2005, 16–17). Nyt kun magneettimateriaalit alkavat olemaan todella kehittyneitä ominaisuuksiltaan, on mahdollista toteuttaa monipuolisia kestopagneettikoneita. Tämä on saanut aikaan paljon tutkimus- ja kehitystyötä, mikä on johtanut kestopagneettikoneiden yleistymiseen erityisesti suoravetojärjestelmissä (Cavagnino, Lazzeri, Profumo & Tenconi 2000, 1), kuten esimerkiksi vaihteettomissa generaattorikäytöissä, sähköajoneuvojen suoravetomoottoreissa sekä hisseissä.

Tässä työssä tutkittava generaattori oli toteutettu aksiaalivuotekniikalla ja kestopagneettin – kyseessä oli siis aksiaalivuokestopagneettitahtikone. Tässä kappaleessa on esitelty aksiaalivuokestopagneettitahtikoneen rakennetta ja toimintaperiaatetta.

#### 3.1 Rakenne

Aksiaalivuokoneessa magneettikenttä on nimen mukaisesti akselin suuntainen. Aksiaalivuorakenteessa staattori ja roottori eivät ole asennettu radiaalivuokoneen tapaan sisäkään, vaan akselin suunnassa peräkkäin, kuten kuvioista 4 voidaan havaita. Staattoreita ja roottoreita voi olla samalla akselilla useampia. Pienitehoisissa käytöissä voidaan käyttää 1 staattori – 1 roottori –periaatetta, jolloin moottori koostuu yhdestä staattorista ja yhdestä roottorista, kuten kuviossa 4. Seuraava askel on hieman suurempiin käyttöihin soveltuva 2 staattoria – 1 roottori –rakenne, jossa staattorit on sijoitettu eripuolille roottoria. (AXCO-Motors Oy 2011.)



KUVIO 4. Aksiaalivuokestomagneettitahtikoneen 1 staattori – 1 roottori rakenne (AXCO-Motors Oy 2011)

1 staattori – 1 roottori –rakenteen heikkous on suuri syntyvä akselinsuuntainen magneettinen voimavaikutus, joka kuormittaa laakereita. Symmetrisessä rakenteessa (esim. 2 staattoria – 1 roottoria) ilmvälillä ollessa tarkasti samankokoiset, kumoavat akselinsuuntaiset magneettiset voimavaikutukset toisensa (Hietalahti 2010, 96).

Staattori on valmistettu esimerkiksi ohuesta sähkölevystä kiekon muotoon siten, että toisella kyljellä on akseliin nähden säteittäin urat, joihin staattorikäämitys on vyyhdedetty. Staattori on kiinnitetty koneen kuoreen. Roottori on yleensä kasattu asentamalla kestopagneetit teräskiekkoon. Roottori on mahdollista valmistaa myös täysin ilman rautaa, mutta tällöin koneen induktanssi pienenee rajusti ja tämä tulee ottaa huomioon käyttöä suunniteltaessa. (Kinnunen 2007, 26; Hietalahti 2010, 96.)

### 3.2 Toimintaperiaate ja ominaisuudet

Kestomagneettikoneen suurin ero yleisempään induktiokoneeseen on roottorikäämityksen puuttuminen. Sen sijaan kestopagneettitahtikone toimii muutoin kuten tavallinen roottorikäämityksellä varustettu tahtikonekin, mutta magnetoinnin tapahtuessa kestopagneetein, ei magnetointi ole säädettävissä. Nimellinopeuden yläpuolella –



kentänheikennysalueella – magnetointia on kuitenkin mahdollista laskea demagnetovalla staattorivirralla, mikä kuitenkin asettaa magneettien materiaalille omat vaatimuksensa demagnetoinnin kestävyys suhteen etenkin toimittaessa syvällä kentänheikennysalueen puolella (Seppä 1997, 47–48).

Magnetoinnin tapahtuessa kestopagneetein, muodostuu vastajännite kierrosnopeudesta riippuvaisesti. Koneen tehokerroin puolestaan määräytyy kuorman perusteella. (Löyttynen 2010, 14–15.)

### 3.3 Sisäisten arvojen määrittäminen

Tämän työn puitteissa oli tarkoitus määrittää laboratoriossa olevan generaattorin sisäiset sähköiset arvot staattoriresistanssin- ( $R_s$ ) ja tahti-induktanssien ( $L_d$  ja  $L_q$ ) osalta, jotta generaattorin toimintaa voitaisiin simuloida tarkemmin olemassa olevalla eri generaattoria varten luodulla Simulink-mallilla. Lisäksi mallia varten oli selvitettävä koneen kestopagneettivuon ( $\psi_{PM}$ ) arvo sekä napapariluku ( $p$ ).

#### Staattoriresistanssi

Staattoriresistanssin mittaaminen on mahdollista suorittaa pysähdyksissä olevalle koneelle. Mittaus tapahtuu syöttämällä yhden staattorikäämin läpi tasavirtaa ja mittaamalla käämin yli oleva jännite. Mikäli koneen käämitys on kytketty sisäisesti tähteen, voidaan mittaaminen suorittaa kahden vaihekäämin päistä ja jakaa tulos kahdella. Staattoriresistanssi olisi hyvä mahdollisuuksien mukaan mitata erikseen kaikkien käämien yli ja ottaa arvoista tämän jälkeen keskiarvo simulaatiomallia varten. (Gorman, Chen & Cathey 1988, 4; Tcheslavski 2008, 31)

Mittaus voidaan suorittaa esimerkiksi käyttämällä Thomson mittasiltaa, tai mikäli resistanssi osoittautuu kyseiselle mittalaitteelle liian suureksi, voidaan käyttää myös tavallista DC-virtalähdettä sekä yleismittareita. Erillistä DC-virtalähdettä ja yleismittareita käytettäessä ei kuitenkaan päästä aivan yhtä tarkkoihin arvoihin kuin erityisesti juuri pieniä resistansseja varten suunnitellulla Thomson mittasilalla.

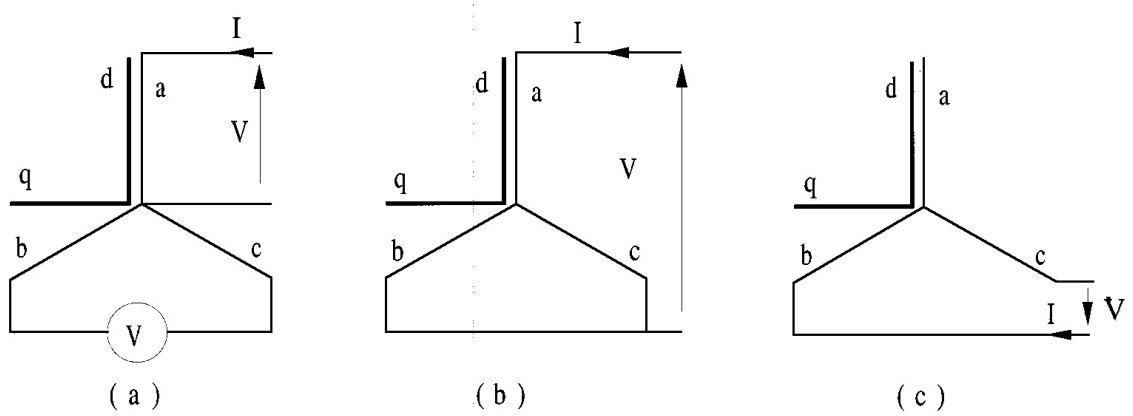
## Induktanssit

Koneen induktanssien määrittämiseen löytyy useitakin erilaisia keinoja. Ehkä varteentottavimmat ovat taajuusvastetesti sekä tyhjäkäyntitestistä, oikosulkutestistä ja kuormitustestistä koostuva kokonaisuus.

Taajuusvastetestissä (SFR-test – Solidstate Frequency Response test), jonka mittauskytkentä on esitetty kuviossa 5, asetetaan roottori siten, että yksi vaihe on tarkalleen d-akselin suuntainen. Asettelu voidaan tehdä syöttämällä haluttuun vaiheeseen vaihtovirtaa ja kääntelemällä akselia niin, että kahden muun vaiheen välinen jännite saa arvon 0 V. Kun tämä kohta löytyy, pysäytetään roottori tähän asentoon (kuvio 5a).

Tämän jälkeen suoritetaan kaksi mittaussarjaa, joista ensimmäinen kuvion 5b kytkennällä, joka on d-akselin induktanssin määrittämiseksi ja toinen kuvion 5c kytkennällä, joka on q-akselia varten. Mittaussarjat toteutetaan siten, että kytkentään syötetään vaihtovirtaa, jonka arvo tulisi olla enintään 0,5 % koneen nimellisvirrasta. Mittaus aloitetaan 1 - 10 mHz taajuudelta ja jatketaan sopivin askelin aina 1000 Hz asti. Mittaussignaalin virran ja jännitteen avulla ratkaistaan mittauskytkentöjen impedanssit  $Z_d$  ja  $Z_q$ . Tätä tarkoitusta varten olisi hyvä olla käytettävissä impedanssianalysaattori, joka nopeuttaisi mittausta huomattavasti ja helpottaisi arvojen tulkitsemista 5 Hz taajuuden yläpuolella. Impedanssien laskennassa on käytettävä kytkennästä johtuvia kertoimia, jotka ovat: d-akselille 2/3 ja q-akselille 1/2. Kerätystä aineistosta voidaan kummallekin akselille piirtää erikseen kuvaaja, jossa vaaka-akselilla on taajuus ja erillisillä pystyakseleilla sekä impedanssin suuruus että vaihekulma.

Lasketuille impedansseille voidaan pienimmän neliösumman menetelmällä ratkaista (sekä kulma että suuruus huomioiden) kerroin  $\alpha$ , joka toteuttaa parhaan sovituksen mitatun ja laskennallisen käyrän välillä. Kerroin on eri molemmille akseleille ( $\alpha_d$  ja  $\alpha_q$ ). Kun kertoimet on ratkaistu ja tiedetään mittaustilanteen aikana vallinneen lämpötilan mukainen arvo staattoriresistanssille, voidaan induktanssit ratkaista kaavan 1 mukaan. (Cavagnino ym. 2000, 2–4.)



KUVIO 5. Taajuusvastemittauskytkentä induktanssien määrittämistä varten (Cavanagio ym. 2000, 3, muokattu)

$$L_d = \frac{R_s \cdot \alpha_d}{2\pi}$$

$$L_q = \frac{R_s \cdot \alpha_q}{2\pi}$$
(1)

Edellä kuvatun ratkaisumallin haasteena on kompleksimuotoisen arvojoukon pienimmän neliösumman menetelmän toteuttaminen. Lisäksi tarkkojen tulosten saamiseksi mittauspisteitä on 1000 Hz taajuuskaistalla otettava kohtalaisen paljon.

Staattorikäänin induktanssit voidaan määrittää myös pyörivän koneen arvoista. Pitkittäisakselin induktanssi saadaan helpoiten määritettyä, kun konetta pyöritetään vakionopeudella ilman kuormaa ja mitataan yhden vaiheen vaihejännite. Tämän jälkeen koneen liittimiin tehdään kolmivaiheoikosulku ja mitataan jatkuvan tilan oikosulkuvirta esimerkiksi muistipiirturilla. Pitkittäisakselin induktanssi voidaan ratkaista kaavan 2 mukaan. (Kinnunen 2007, 58.)

$$L_d = \frac{U_{s,oc}}{\omega_s \cdot I_{s,ssc}}$$
(2)

missä:

$U_{s,oc}$  on kuormittamattoman koneen vaihejännite

$\omega_s$  on mittaustilanteen kulmanopeus

$I_{s,ssc}$  on jatkuvantilan oikosulkuvirta

Yllä kuvatussa mittauksessa on huomioitava, että oikosulussa kestopagneettikone tuottaa voimakkaan momentti-iskun, mikä voi olla vaaraksi järjestelmän komponenteille. Voimakoneen olisi myös syytä olla niin voimakas, että se jaksaisi pitää kierrosnopeuden vakiona oikosulussa.

Poikittaisakselin induktanssin  $L_q$  määrittäminen on hieman monimutkaisempi prosessi kuin pitkittäisen induktanssin. Poikittaisakselin induktanssi voidaan määrittää kuormituskokeella, kun käytetään induktiivista kuormaa. Poikittainen induktanssi voidaan laskea kaavalla 3. Kaavassa tarvittavista arvoista tehokulma on ratkaistava ennen lopullista kaavan ratkaisemista. Tehokulma voidaan ratkaista kaavalla 4. (Kinnunen 2007, 58-60.)

$$L_q = \frac{-U_s \cdot \sin \delta + I_s \sin(\delta + \varphi) \cdot R_s}{\omega_s \cdot I_s \cdot \cos(\delta + \varphi)} \quad (3)$$

$$\delta = \cos^{-1} \left( \frac{-2 \cdot E_{PM} \cdot B \pm \sqrt{(E_{PM} \cdot B)^2 - 4 \cdot (A^2 + B^2) \cdot (E_{PM}^2 - A^2)}}{2 \cdot (A^2 + B^2)} \right) \quad (4)$$

$$A = -\omega_s \cdot L_d \cdot I_s \cdot \cos \varphi + R_s \cdot I_s \cdot \sin \varphi$$

$$B = -\omega_s \cdot L_d \cdot I_s \cdot \sin \varphi - R_s \cdot I_s \cdot \cos \varphi - U_s$$

Kaavoissa 3 ja 4:

$U_s$  on generaattorin liittimistä mitattu vaihejännite

$\delta$  on tehokulma

$I_s$  on vaihevirta

$\varphi$  on vaihekulma

$R_s$  on samassa käyttölämpötilassa mitattu staattorikäänin resistanssi

$\omega_s$  on kulmanopeus

$E_{PM}$  on generaattorin sähkömekaaninen voima – sama kuin tyhjäkäyntijännite.

Tehokulma voidaan myös mitata, mikäli käytettävissä on akselin asennon ilmaiseva anturi. Tehokulman mittausta tapahtuu vertaamalla kuormitetun ja kuormittamattoman koneen jännitteiden vaihe-eroa. Asentoanturilla voidaan määrittää tyhjäkäynnin ja kuormitustilan jännitteistä ajallisesti toisiaan vastaavat kohdat. Tosin mittauksessa pitää tehdä fourieranalyysi, jotta löydetään molempien mitattujen aaltojen perustaajuus. (Cavagnino ym. 2000,5)

Cavagnino ym. (2000, 5) mainitsevat aineistossaan, että edellä kuvatussa poikittaisen induktanssin määrittämisessä tulisi induktiivisen kuorman sijaan käyttää puhtaasti resisitiivistä kuormaa.

Edellä mainitut arvot on Hietalahden (2010, 102) mukaan mahdollista määrittää myös taajuusmuuttajan identifiointiajolla. Tämä olisi varmasti helpoin ja kenties tarkin tapa määrittää parametrit, koska edellä esitellyissä keinoissa on suoritettava melko paljon mittauksia, joissa on mahdollista tehdä virheitä, jotka kertautuvat lopputuloksessa. Ongelmaksi muodostuu kuitenkin se, että taajuusmuuttajasta ei useimmiten ole mahdollista saada kyseisiä parametreja luettavaksi, vaan parametrit rekisteröidään vain taajuusmuuttajan sisäiseen käyttöön.

### Näpaluku

Koneen näpapariluku on laskettavissa samoilla keinoilla kuin oikosulkukoneenkin, eli kuten kaavassa 5.

$$p = \frac{f_s}{n_n} \quad (5)$$

### Kestomagneettivuo

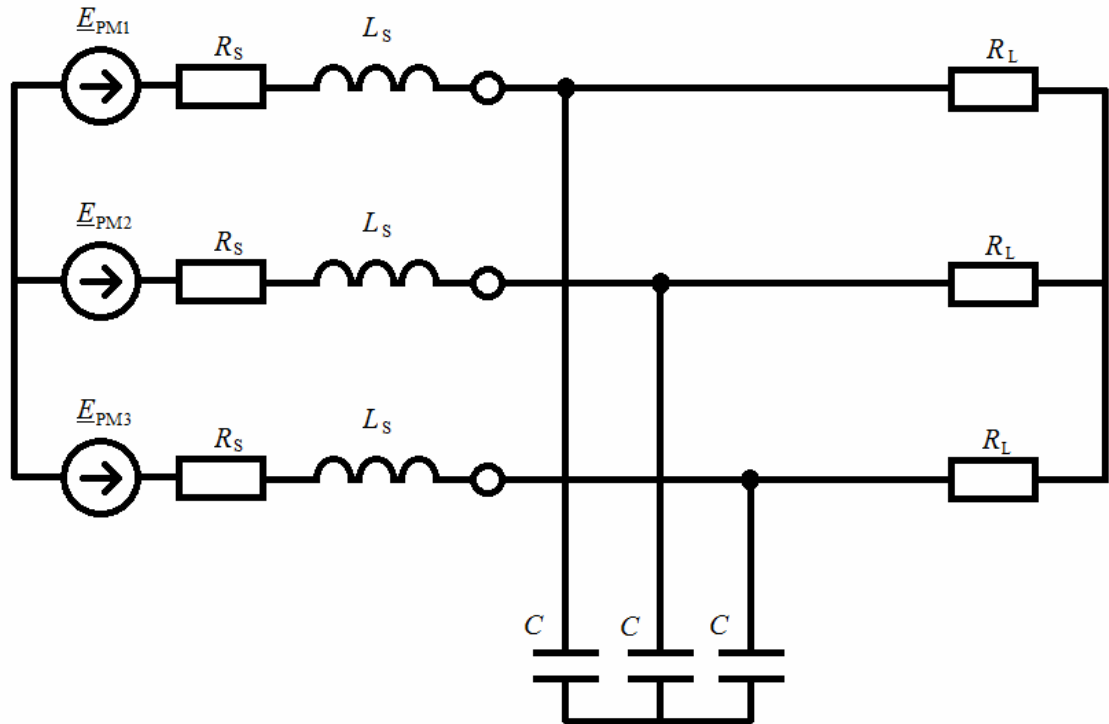
Kestomagneettivuo  $\psi_{PM}$  on laskettavissa, kun tiedetään sähkömekaanisen voiman huipparvo sekä sähkökentän kulmanopeus, kuten kaavasta 6 käy ilmi (Hietalahti 2010, 100).

$$\hat{E}_{PM} = \omega_s \cdot \psi_{PM} \Rightarrow \psi_{PM} = \frac{\hat{E}_{PM}}{\omega_s} = \frac{\sqrt{2} \cdot E_{PM}}{2 \cdot \pi \cdot f_s} \quad (6)$$

## 3.4 Magnetoinnin kasvattaminen kapasitanssilla

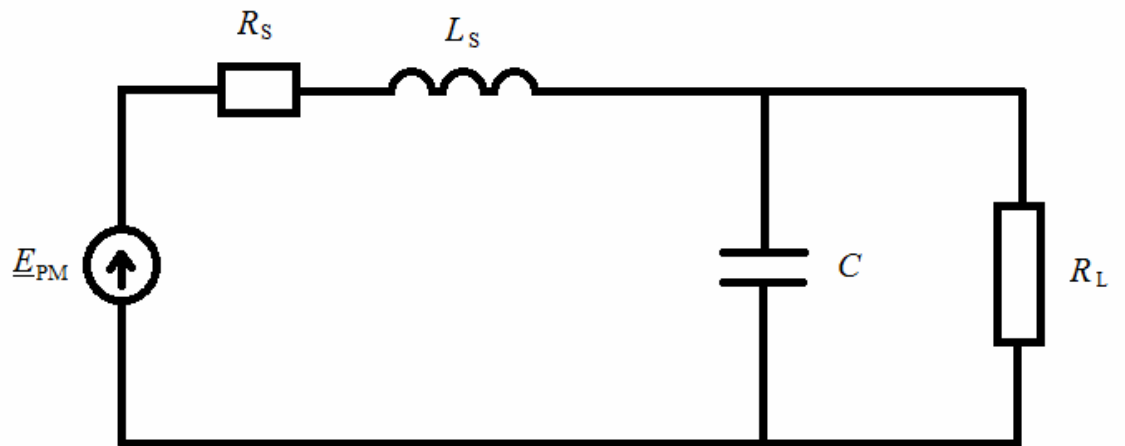
Vaikka kestopäpääntekoneen magneettivuo ei itsessään ole säädettävissä, on magnetointia kuitenkin mahdollista tehostaa kytkemällä kondensaattori koneen ulostuloon kuorman rinnalle. Näin toimien kompensoidaan staattori-induktanssin loistehoa ja nos-

tetaan napajännitettä, mikä taas tarkoittaa sitä, että samasta koneesta voidaan saada enemmän pätötehoa kuormalle. Kompensoinnin kanssa tulee kuitenkin olla varovainen, koska ylikompensointitilanteessa voimakas kapasitiivinen staattorivirta voi pahimmillaan demagnetoida koneen kestopaamagnetit. Kondensaattorin kytkentä on esitetty kuviossa 6.



KUVIO 6. Yksinkertaistettu kolmivaiheinen kytkentäkuva generaattorikäytöstä kompensointikondensaattoreiden kanssa

Kuvion 6 kytkennästä voidaan tehdä yksivaihesijaiskytkentä, koska toiminta on symmetristä kaikkien vaiheiden kannalta. Yksivaihesijaiskytkentä on esitetty kuviossa 7 ja siitä voidaan todeta kyseessä olevan sarjaresonanssipiiri. Sarjaresonanssipiirin resonanssitaajuus määritetään kaavan 7 mukaan ja resonanssitaajuuden tulee olla suurempi kuin generaattorikäytön suurin normaalissa käyttötilanteessa esiintyvä taajuus, jotta kytkentä ei muutu kapasitiiviseksi ja ala demagnetoidaan konetta.



KUVIO 7. Kompensoidun generaattorikäytön yksivaiheinen yksinkertaistettu sijaiskytkentä

$$f_0 = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{L \cdot C}} \quad (7)$$

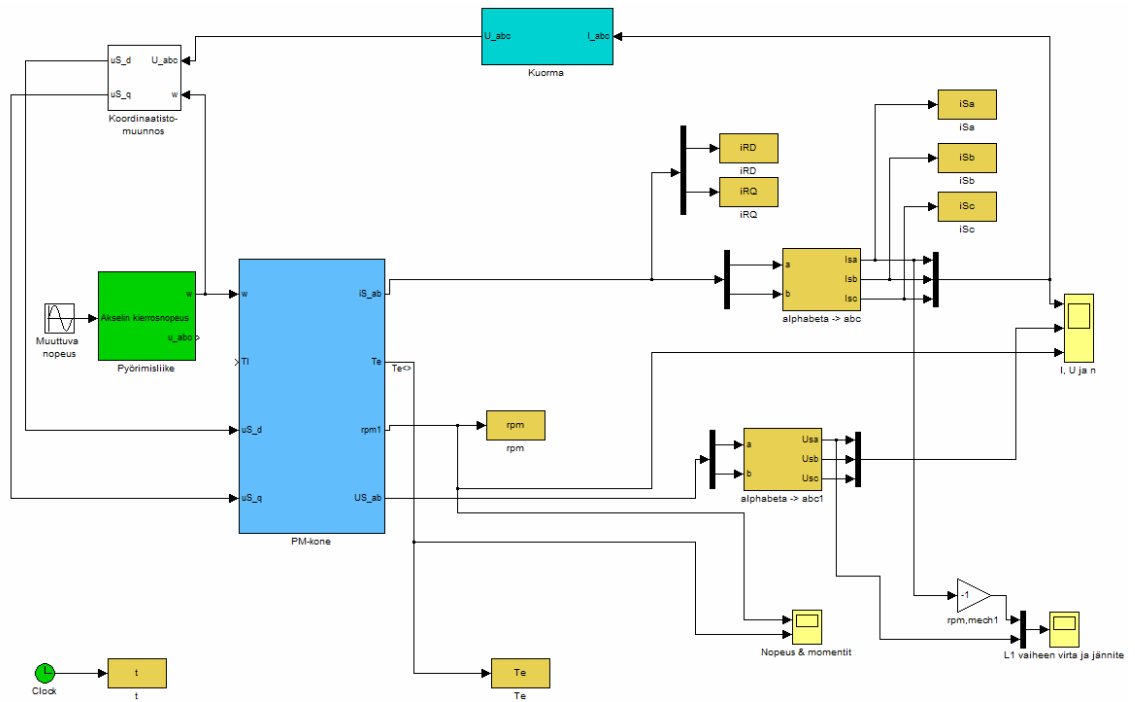
## 4 SIMULAATIOMALLI

Simulaatiomalli kestopagneettitahtigeneraattorille oli valmiiksi olemassa toisesta käyttösovelluksesta, mutta mallia varten oli selvitettävä koneen parametrit. Parametrit oli mahdollista osin ottaa suoraan ja osin laskea valmistajalta saatujen teknisten tietojen perusteella. Koneen parametrit oli kuitenkin mahdollista määrittää myös mittauksin. Parametrit päädyttiin määrittämään mittausten ja kokeilemisen kautta, koska kone ei tuntunut aivan vastaavan valmistajan antamia arvoja.

Simulaatiomallin perusrunko on esitelty kuviossa 8. Simulaatiomalli on toteutettu Matlab-ohjelmiston Simulink-ympäristössä. Malli on jaettu d- ja q-akseliin ja vastaa siten hyvin todellisen PM-koneen toimintaa dynaamisessa käytössä tietyin rajoittein. Malli ei sisällä kyllästymisen, lämpenemisen ja ankkurireaktion vaikutuksia.

Vihreässä aliohjelmassa toteutetaan muuttuva pyörimisliike. Ohjaavana arvona pyörimisliikkeelle annetaan koneen sähkökentän pyörimistaajuus. Sinisessä aliohjelmassa toteutetaan PM-koneen käyttäytyminen. PM-koneelle annettavat parametrit ovat:  $L_d$ ,  $L_q$ ,  $R_s$ ,  $p$  ja  $\psi_{PM}$ . Turkoosin värisessä aliohjelmassa sijaitsee kuormatieto ja sille annetaan parametrinä kuormavastus. Keltaisella värjätty osiot liittyvät virran ja jännitteen mittaamiseen sekä koordinaatistomuutoksiin.





KUVIO 8. Simulink-malli PM-kone ja kuorma

## 5 TUTKIMUKSET LABORATORIOSSA

### 5.1 Laitteiston tekniset tiedot

#### 5.1.1 Generaattori

Generaattorina käytettiin Axco Motorsin valmistamaa AF-PMG-2/250 kestopagneetti-generaattoria. Generaattorin kilpiarvot on esitetty taulukossa 2.

TAULUKKO 2. Generaattorin kilpiarvot

$n_n$	$n_{\max}$	$f_s$	$P_n$	$I_n$	$U_Y$
rpm	rpm	Hz	kW	A	V
250	500	20,8	2,0	5,0	250

Kilpiarvotietojen perusteella voidaan laskea generaattorin napapariluku (kaava 8) sekä nimellismomentti (kaava 9).

$$p = \frac{f_s}{n_n} = \frac{20,8 \text{ Hz}}{250 \text{ rpm} / 60} = 4,992 \Rightarrow p = 5 \quad (8)$$

$$T_n = \frac{P_n}{2 \cdot \pi \cdot n_n} = \frac{2000 \text{ W}}{2 \cdot \pi \cdot 250 \text{ rpm} / 60} = 76,4 \text{ Nm} \quad (9)$$

#### 5.1.2 Servomoottorikäyttö

Generaattoria käytettiin laboratorion servomoottorikäytöllä, jonka tekniset tiedot on esitetty taulukossa 3.

TAULUKKO 3. Servokäytön tekniset tiedot

$n_n$	$M_n$	$M_k$	$K_T$
rpm	Nm	Nm	Nm/A <sub>rms</sub>
3000	18	23,4	2,0

## 5.2 Generaattori osana tutkimuslaitteistoa

Generaattorin kiinnittäminen laboratorion servokäyttöön oli tehtävä vaihteen välityksellä pyörimisnopeuksien nimellisarvojen suuren eron takia. Tavoitteena oli pyrkiä välityssuhteeseen  $i = 1500 : 250 \text{ rpm} = 6:1$ .

### 5.2.1 Vaihteen valinta

Vaihteen mitoitus alkoi tutustumisella valmistajan SEW-Eurodrive tarjontaan. Kyseiseltä valmistajalta löytyikin hyvin kyseiseen käyttöön soveltuvia malleja. Päädyttiin tutkimaan tarkemmin jalallisia malleja, eli R-sarjaa, kuten kyseinen valmistaja näitä malleja nimittää.

Vaihteen mitoitus tehtiin servokäytölle ilmoitetun suurimman momentin mukaan. Näin siksi, että servokäyttö-vaihde –yhdistelmää voidaan käyttää myös muissa tutkimuksissa kuin vain tämän tutkintotyön generaattorin kanssa. Koska vaihteiden suurimmat sallitut momentit ilmoitetaan toisioakselin puolelle, oli servokäytön momentti laskettava toisioon välityssuhteen  $i$  avulla (kaava 10). Tässä kohtaan oletettiin vaihteen hyötysuhteen olevan 1.

$$T_1 = \frac{T_2}{\eta} \cdot \frac{n_2}{n_1} \quad (10)$$

$$T_2 = T_1 \cdot \frac{n_1}{n_2} = T_1 \cdot i \quad (11)$$

$$T_2 = 23,4 \text{ Nm} \cdot 6 = 140,4 \text{ Nm} \quad (12)$$

Vaihteelta vaaditaan siis vähintään 140,4 Nm momentin kesto toisiopuolella. Valmistajan tuoteluettelosta löytyikin hyvin käyttöön soveltuva vaihdemalli R47AD2 välityssuhteella  $i = 6,00$  ja toisioakselin maksimimomentilla 156 Nm (SEW-Eurodrive 2010a, 160-161).

Ainoa asia, mikä kyseisen vaihteen kohdalla ei täsmännyt käytön kanssa, oli nimellisyörimisnopeus 1400 rpm. Sähköpostikyselyllä varmistettiin valmistajan teknisestä tuesta, että kyseinen vaihde soveltuu käytettäväksi 3000 rpm nopeudella.

Teknisen tuen vastauksen mukaan vaihdetta voi hammastuksen puolesta käyttää 3000 rpm nopeudella, mutta kuorman ollessa jatkuvasti 156 Nm tulee voiteluöljyn olla syntetistä ja tiivisteiden Viton-mallisia, koska vaihteen lämpötila nousee yli 90°C:n. Eri-tyisesti servokäyttöä varten teknisen tuen henkilö suositteli myös redusoidun välityksen käyttöä (R47/R AD2) vaihteen välyksen pienentämiseksi. (Strömberg 2011.)

Lämpötilan nousu ei liene ongelma tässä käytössä, koska kierrosnopeus tulee hyvin harvoin olemaan korkea pitkiä aikoja suurella momentilla. Koska vaihde on mitoitettu servokäytön maksimimomentin mukaan, on toisio- akselin akseliin ei ole merkitystä. Välyksen redusointia ei siis tarvita. Käyttöön valittiin taulukon 4 mukainen vaihde.

$$T_2 = 18,0 \text{ Nm} \cdot 6 = 108 \text{ Nm} \quad (13)$$

Tämän tutkintotyön mukaisessa käytössä ei ole myöskään juuri merkitystä vaihteiston välyksellä, koska toisio- akselin akseliin ei ole merkitystä. Välyksen redusointia ei siis tarvita. Käyttöön valittiin taulukon 4 mukainen vaihde.

TAULUKKO 4. Valitun vaihteen tekniset tiedot

Valmistaja: SEW-EURODRIVE					
Malli: R47 AD2					
$i$	$n_1$	$n_2$	$M_{2\max}$	$P_e$	$m$
	rpm	rpm	Nm	kW	kg
6,00	1400	233	156	4,0	16

Ennen lopullista tilausta varmistettiin vielä valmistajalta, että kyseistä vaihdetta voi käyttää myös ylennysvaihteena, koska tutkittavana olevaa generaattoria voi käyttää myös moottorina. Tiedusteltiin myös vaihteen kestävyyttä momentti-iskujen suhteen. Valmistajan teknisen tuen mukaan vaihdetta voi käyttää hyvän hyötysuhteen ansiosta myös ylennysvaihteena, kuitenkin siten että ensiön kierrosnopeus ei saa ylittää 4500 rpm nopeutta, joka on vaihteen rakenteellinen maksiminopeus. Momentti-iskujen osalta ilmeni, että teknisissä tiedoissa ilmoitettu 156 Nm on rakenteellinen maksimimomentti, jota ei saa ylittää. Tämä tulee huomioida eri käyttötilanteissa siten, että pyörivää gene-

raattoria ei missään tilanteessa oikosuljeta ja näin aiheuteta voimakasta momentti-iskua. (Strömberg 2011.)

Teknisten ominaisuuksien varmistuttua käyttöön sopiviksi, laadittiin tarjouspyyntö, joka lähetettiin SEW-Eurodrivelle 26.1.2011. Seuraavana päivänä saatiin tarjous, joka toimitettiin eteenpäin laboratoriohenkilökunnalle tilausta varten.

### 5.2.2 Vaihteen ja generaattorin kiinnitys servokäyttöön

Kun vaihde oli valittu, oli alettava suunnittelemaan, miten vaihde ja generaattori kiinnitetään servokäytön alustaan. Lähtökohtana käytettiin laboratorioon syksyllä 2010 erästä laboratorioprojektia varten hankittua laturin jalkaa. Suunnittelussa lähdettiin liikkeelle siitä, että jalkojen tulee olla hyvin yksinkertaisia ja hyvin säädettävissä olevia. Koska servomoottorin kiinnitys ei ollut säädettävissä ja vaihde tuli asentaa jalan päälle, jätettiin jalka 3 mm tarkkaa laskennallista korkeutta matalammaksi, jotta jalan korkeus voidaan säätää shimmilevyillä sopivaksi. Toinen huomioitava asia oli, että vaihteessa ensiöakseli on 14 mm toisioakselia alempana. Generaattorin kiinnitys tuli siis suunnitella 14 mm servomoottorin akselilinjaa korkeammaksi. Suunnitellut jalat on esitelty liitteissä 1 ja 2. Jalat tilattiin MTP-Konopaja Oy:ltä laboratoriohenkilökunnan toimesta.

Kiinnitysjalkojen lisäksi laboratorioon oli käyttöä varten hankittava kytkinlaitteet akseliin. Kytkimet valittiin samasta mallisarjasta, kuin laboratoriossa jo käytössä olevat kytkimet. Kytkimien valinnassa avusti koulun laboratorioinsinööri, joka osasi suoraan sanoa, mitä mallia on tilattava ja minkälaiset sovitteet kytkimiin on samalla hankittava. Käyttöä varten oli tilattava 3 kpl IPL Transmissionin KI111610 mallisia kytkimiä ja näihin 2 kpl 30 mm akselisovitteita, sekä 1 kpl 19 mm akselisovite. Lisäksi kytkimien väliin oli tilattava 2 kpl vaimenninkumeja. Edellä mainitut kytkintuotteet tilattiin SKS Mekaniikan kautta laboratoriohenkilökunnan toimesta.

### 5.3 Mittaukset

#### 5.3.1 Staattorikämmiresistanssit

Staattorikämmien resistanssimittaus suoritettiin huoneenlämpöiselle koneelle ja kuormituskokeen lämmentä koneelle. Koska staattorikämmien tähtipiste tutkitussa koneessa on kuoren sisällä, eikä sitä ole tuotu kytkentäkoteloon, oli staattoriresistanssit mitattava kahden kämmen yli. Resistanssit mitattiin syöttämällä tasavirtaa kahden kämmen läpi ja mittaamalla niiden yli oleva jännite. Mitattujen arvojen avulla ratkaistiin kahden staattorikämmen yhteinen resistanssi. Kun kaikki kämmet oli mitattu, otettiin resistanssiarvoista keskiarvo, jolloin tiedettiin keskimääräinen kahden sarjassa olevan kämmen resistanssi. Yhden staattorikämmen keskimääräinen resistanssi  $R_s$  saatiin jakamalla edellä laskettu keskiarvo kahdella. Mittaustulokset on esitelty taulukossa 5.

TAULUKKO 5. Staattorikämmien resistanssimittauksen tulokset

	$T_{amb}$	$I_{1-2}$	$U_{1-2}$	$R_{1-2}$	$I_{2-3}$	$U_{2-3}$	$R_{2-3}$
	°C	A	V	Ω	A	V	Ω
Kylmä kone	21	1,010	3,420	3,386	1,020	3,390	3,324
Kuuma kone	21	1,017	4,081	4,013	1,017	4,075	4,007

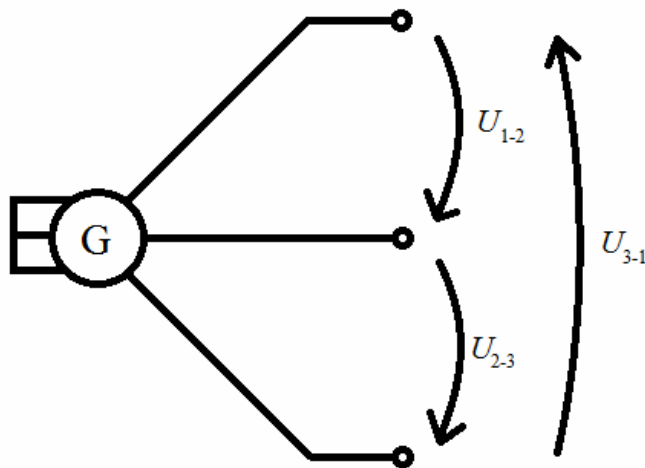
	$I_{3-1}$	$U_{3-1}$	$R_{3-1}$	$R_{avg}$	$R_s$
	A	V	Ω	Ω	Ω
Kylmä kone	1,020	3,380	3,314	3,341	1,671
Kuuma kone	1,017	4,056	3,988	4,003	2,001

Mittausten tuloksena saatu kylmän koneen resistanssi on noin 4,4 % suurempi kuin valmistajan ilmoittama. Ero johtunee valmistustoleransseista, mittausepä tarkkuudesta sekä lämpötilasta. Koska simulaatiomalli ei huomioi komponenttien lämpenemää, tulee parametrinä käyttää lämmentä koneen staattoriresistanssin arvoa.

#### 5.3.2 Tyhjäkäyntimittaus

Tyhjäkäyntimittauksen tarkoitus oli selvittää koneessa indusoituva vaihekohtainen sähkömekaaninen voima  $E_{PM}$ . Mittauskytkentä on esitetty kuviossa 9. Mittaukset suorit-

tiin siten, että koneen nopeutta nostettiin noin 100 rpm portailla ja mitattiin generaattorin liittimistä kaikki pääjännitteet. Näistä tuloksista otettiin keskiarvo ja ratkaistiin siitä yhden vaiheen keskimääräinen indusoitunut jännite  $E_{PM}$ . Napapariluvun avulla ratkaistiin myös koneen sähköinen taajuus eri pyörimisnopeuksilla (kaava 8). Indusoituneen jännitteen ja sähköisen taajuuden avulla oli mahdollista ratkaista koneen kestopagneettivuokaavan 14 avulla. Mittaustulokset on esitetty taulukossa 6.



KUVIO 9. Tyhjäkäyntimittauksessa käytetty kytkentä

Taulukon 6 tuloksista on piirretty kuvioon 10 kuvaaja  $E_{PM} = f(n)$ , johon on lisätty lineaarinen trendiviiva. Kuvion 10 kuvaajan lineaarinen regressioanalyysi antoi tulokseksi 0,556, mikä tarkoittaa että yhdistämällä kaavat 5 ja 6 kaavaksi 14 voidaan todeta olevan:

$$\begin{aligned}\hat{E}_{PM} &= 2 \cdot \pi \cdot f_s \cdot \Psi_{PM} = 2 \cdot \pi \cdot p \cdot \frac{n}{60} \cdot \Psi_{PM} = \sqrt{2} \cdot 0,556 \cdot n \\ \Rightarrow \frac{\sqrt{2} \cdot E_{PM}}{n} &= 2 \cdot \pi \cdot p \cdot \frac{n}{60} \cdot \Psi_{PM} = \sqrt{2} \cdot 0,556 \\ \Rightarrow \Psi_{PM} &= \frac{\sqrt{2} \cdot 0,556}{2 \cdot \pi \cdot p} \cdot 60 = \frac{\sqrt{2} \cdot 0,556}{2 \cdot \pi \cdot 5} \cdot 60 = 1,50 \text{ Wb}\end{aligned}\tag{14}$$

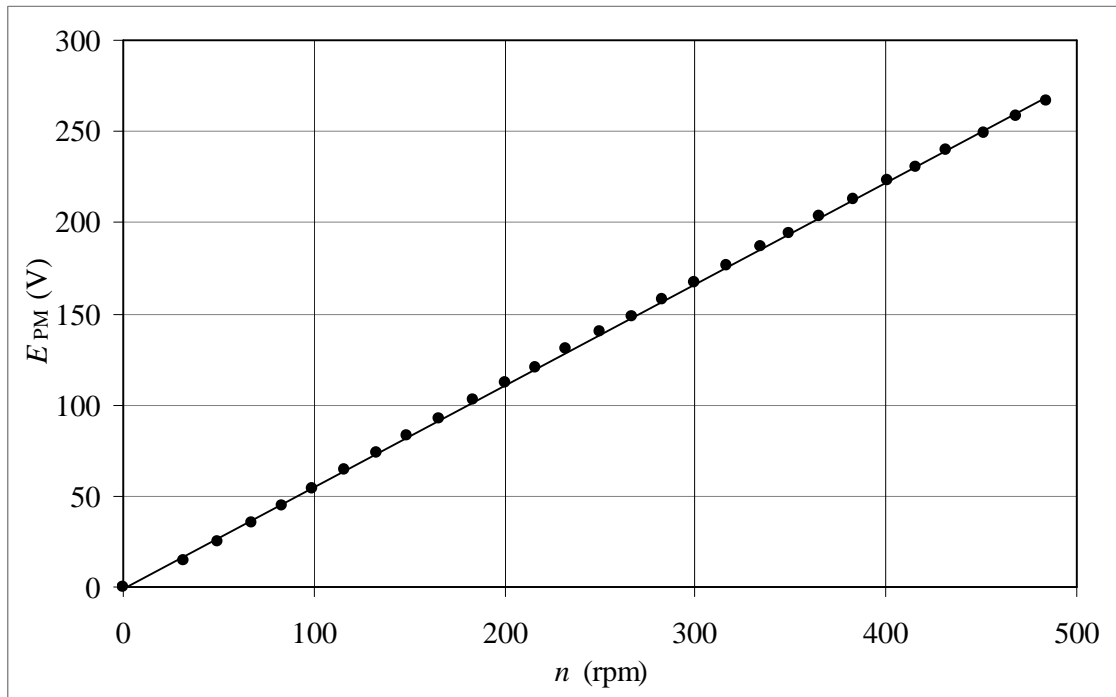
Vertaamalla taulukon 6 kestopagneettivuon arvoja kaavalla 14 laskettuun, voidaan arvojen todeta vastaavan toisiaan hyvin. Koneen kestopagneettivuon arvo on siis 1,50 Weberiä.

Valmistajalta saatujen teknisten tietojen perusteella (liite 3) indusoituneen pääjännitteen tulisi nimellisa nopeudella olla 250 V. Kun tästä ratkaistaan koneen kestopäällykettä, saadaan tulokseksi 1,56 Wb, mikä poikkeaa tyhjääntymittauksen avulla määritetystä arvosta.

TAULUKKO 6. Tyhjääntymittauksen tulokset, nimellispiste korostettu värillä

$n$	$n$	$U_{1-2}$	$U_{2-3}$	$U_{3-1}$	$U_{avg}$	$E_{PM}$	$\hat{E}_{PM}$	$f_s$	$\psi_{PM}$
rpm	rpm	V	V	V	V	V	V	Hz	Wb
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	
199	32	25,2	24,9	24,7	24,9	14,4	20,3	2,7	1,21
299	50	42,5	43,4	43,3	43,1	24,9	35,2	4,2	1,34
400	67	61,3	60,7	61,7	61,2	35,4	50,0	5,6	1,43
499	83	78,4	77,5	78,1	78,0	45,0	63,7	6,9	1,47
598	99	94,5	94,3	94,1	94,3	54,4	77,0	8,3	1,49
702	116	111,9	111,2	112,2	111,8	64,5	91,2	9,7	1,50
802	133	128,7	127,5	128,3	128,2	74,0	104,7	11,1	1,50
901	149	144,4	143,4	144,9	144,2	83,3	117,8	12,4	1,51
1000	166	160,6	160,0	161,3	160,6	92,7	131,2	13,8	1,51
1101	184	178,0	176,6	178,3	177,6	102,6	145,0	15,3	1,51
1199	200	194,0	192,3	194,7	193,7	111,8	158,1	16,7	1,51
1294	216	208,8	207,6	209,7	208,7	120,5	170,4	18,0	1,51
1400	232	225,5	224,8	226,7	225,7	130,3	184,2	19,3	1,52
1500	250	241,9	240,5	243,2	241,9	139,6	197,5	20,8	1,51
1600	267	258,3	256,5	259,0	257,9	148,9	210,6	22,3	1,51
1697	283	273,5	271,5	274,7	273,2	157,8	223,1	23,6	1,51
1798	300	290,0	288,5	291,0	289,8	167,3	236,7	25,0	1,51
1901	316	306,1	304,1	307,6	305,9	176,6	249,8	26,3	1,51
2005	334	323,5	320,5	324,5	322,8	186,4	263,6	27,8	1,51
2094	349	337,1	334,7	338,3	336,7	194,4	274,9	29,1	1,50
2195	365	352,6	350,6	354,6	352,6	203,6	287,9	30,4	1,51
2296	383	369,1	366,4	370,7	368,7	212,9	301,1	31,9	1,50
2405	401	386,4	383,7	388,3	386,1	222,9	315,3	33,4	1,50
2492	416	400,0	396,9	401,5	399,5	230,6	326,2	34,7	1,50
2593	432	415,6	413,0	417,7	415,4	239,8	339,2	36,0	1,50
2701	451	432,4	429,8	434,2	432,1	249,5	352,8	37,6	1,49
2806	468	448,6	445,5	450,6	448,2	258,8	366,0	39,0	1,49
2901	484	463,3	460,1	465,1	462,8	267,2	377,9	40,3	1,49



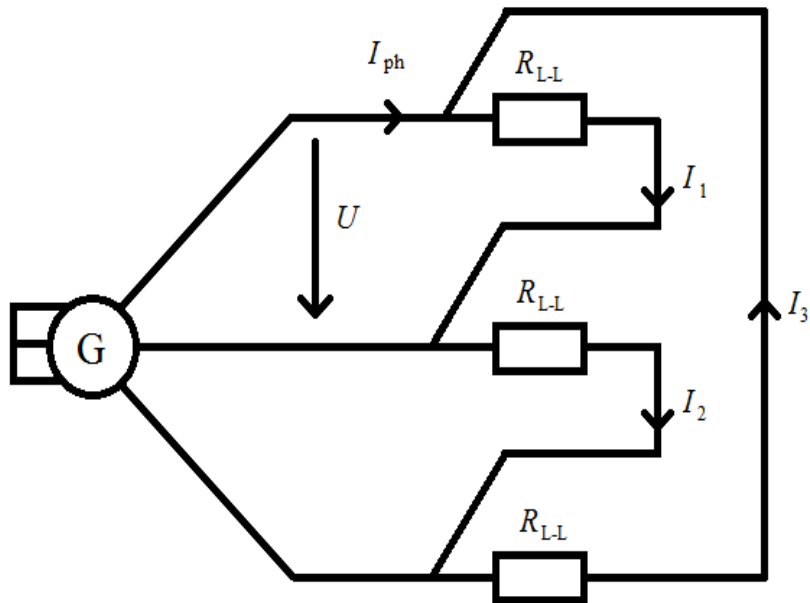


KUVIO 10. Indusoitunut vaihejännitteen tehollisarvo pyörimisnopeuden funktiona

### 5.3.3 Kuormitusmittaus resistiivisellä kuormalla

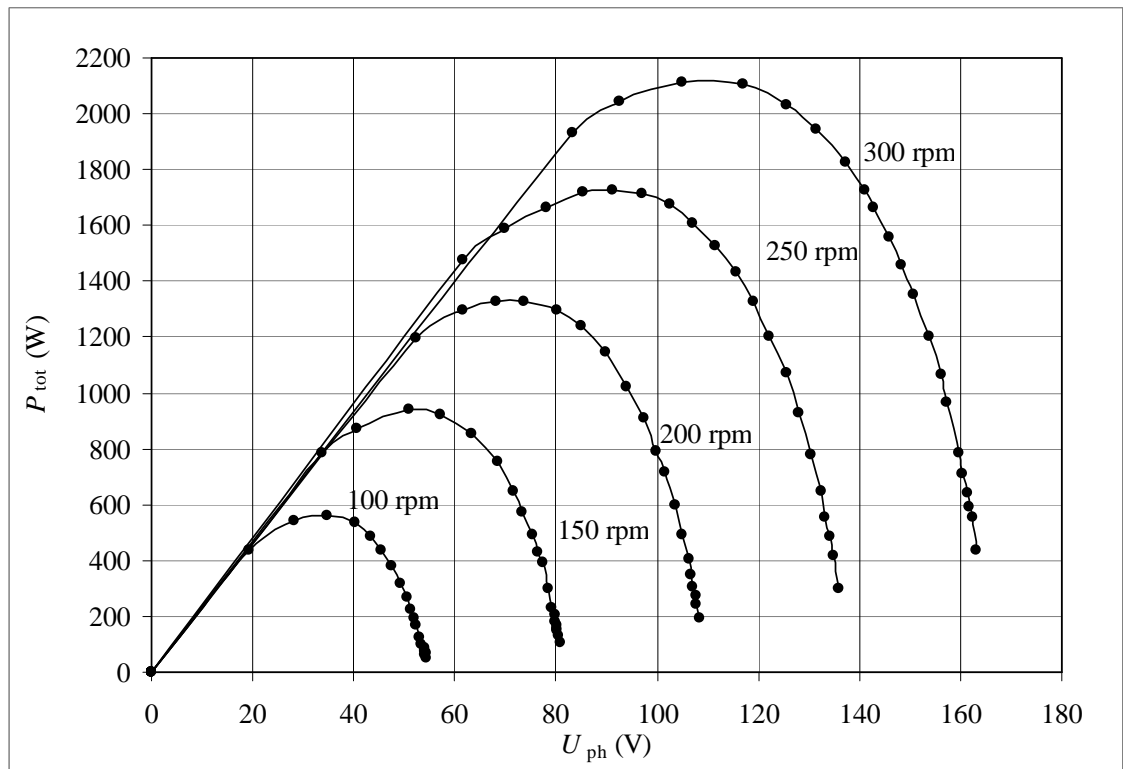
Tyhjäkäyntimittauksen jälkeen siirryttiin kuormitusmittauksiin. Kuormitusmittausten ensimmäisessä vaiheessa generaattoria kuormitettiin resistiivisellä kuormalla ja tarkoituksena oli varmistaa, että valmistajan teknisissä tiedoissa (liite L3) annetut tehokäyrät toteutuvat kyseisellä koneella. Mittaus suoritettiin pyörittämällä generaattoria vakionopeudella ja muuttamalla kuormitusresistanssia sopivin askelin välillä  $\sim 180 \, \Omega - 4 \, \Omega$  siten, että valmistajan antamaa generaattorin maksimivirtaa 8 A ei ylitetty. Kuormavastukset oli kytkettävä kolmioon, koska käyttämiemme vastusten virtakestoisuus oli vain 5 A ja mittaukset suoritettiin valmistajan generaattorille antaman 8 A maksimivirtarajan mukaan. Mittauskytkentä on esitetty kuviossa 11. Kytkennästä mitattiin erikseen kaikkien vastusten yli olevat jännitteet ja kolmion sisällä kulkevat virrat. Virtojen ja jännitteiden keskiarvojen avulla laskettiin sähköinen kokonaisteho kaavalla 15.

$$P_{\text{tot}} = 3 \cdot U_{\text{avg}} \cdot I_{\text{avg}} \quad (15)$$

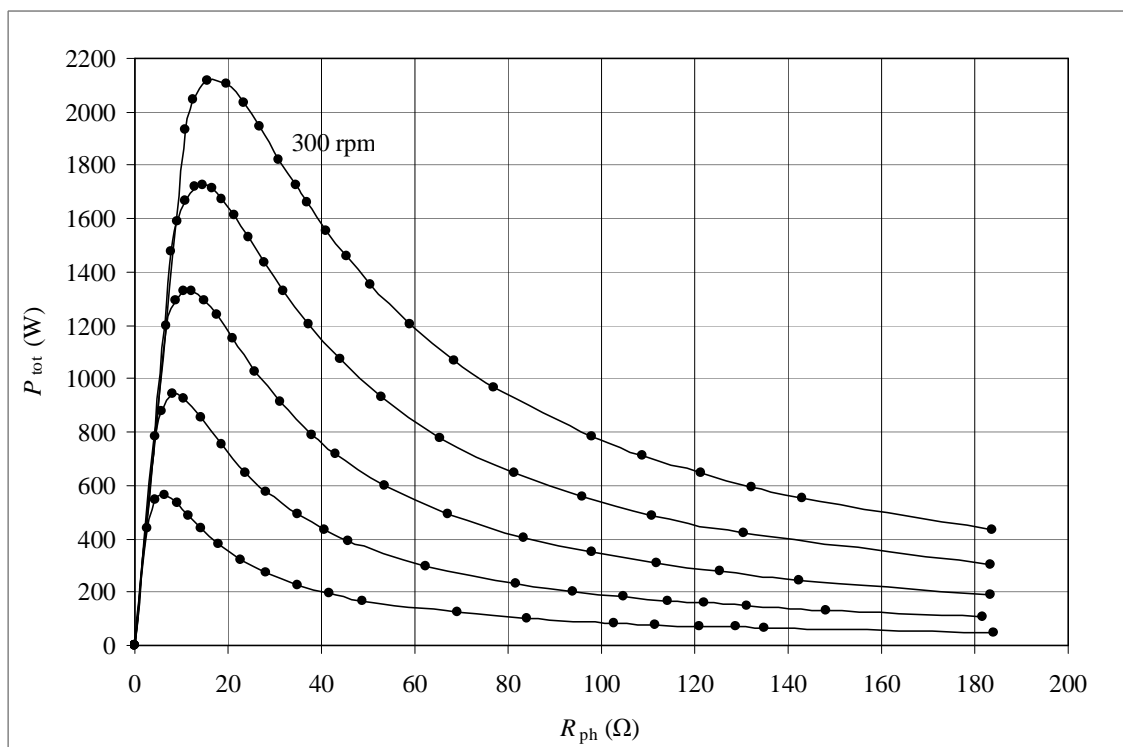


KUVIO 11. Kuormitusmittauksen kytkentäkuva

Kuormitusmittauksen tuloksena saadut käyrät on esitetty kuvioissa 12 ja 13. Taulukkomuodossa samat tulokset sekä tarkempi mittauskytkentä löytyvät liitteestä 5. Mittauksia tehdessä todettiin, että kierrosnopeudella 50 rpm mittareiden lukemien tarkka havainnoiminen on hyvin vaikeaa vaihtosähkön alhaisesta taajuudesta (4,2 Hz) johtuen ja tulitiin siihen tulokseen, että luotettavia tuloksia ei kyetä saamaan näin alhaisella nopeudella. Edellä mainitusta johtuen mitatuista tehokäyristä puuttuu 50 rpm nopeuden käyrä.



KUVIO 12. Kuormitusmittaus resistiivisellä kuormalla  $P_{\text{tot}} = f(U_{\text{ph}})$



KUVIO 13. Kuormitusmittaus resistiivisellä kuormalla  $P_{\text{tot}} = f(R_{\text{ph}})$

Käyriä tutkimalla ja vertaamalla liitteen 3 käyriin voi todeta mitattujen tulosten poikkeavan melko paljon valmistajan ilmoittamista. Samalla vaihejännitteellä saadaan kai-

kissa mittauksissa pienempi kokonaisteho kuin valmistaja ilmoittaa. Tehokäyrät kääntyvät myös laskuun pienemmällä jännitteen arvolla kuin valmistajan mittauksissa. Taulukkoon 7 on kerätty eri käyriltä katsotut huipputehojen ja kyseisen tehon tuottavien jännitteiden arvot mitatuista ja valmistajan ilmoittamista tuloksista.

TAULUKKO 7. Huipputehot eri kierrosnopeuksilla

$n$	Mitattu		Ilmoitettu	
	$P_{\max}$	$U_{\text{ph}}$	$P_{\max}$	$U_{\text{ph}}$
rpm	W	V	W	V
300	2120	108	2500	118
250	1730	93	2040	98
200	1350	73	1610	78
150	950	51	1150	58
100	575	35	710	38

Mittauskytkennässä syntyy jonkin verran häviöitä. Tutkitaan seuraavaksi johdinhäviöiden osuutta suurimmalla sallitulla virralla 8 A.

Generaattorin ja kuorman välillä oli mittauskytkennässä n. 4 metriä  $2,5 \text{ mm}^2$  ja n. 1,5 metriä  $1,5 \text{ mm}^2$  kuparikaapelia.  $2,5 \text{ mm}^2$  kuparijohtimen resistanssi on  $r_{2,5} = 8,770 \Omega / \text{km}$  ja  $1,5 \text{ mm}^2$  kuparijohtimen resistanssi  $r_{1,5} = 14,620 \Omega / \text{km}$ . Näin ollen kaapeleiden kokonaisresistanssi generaattorin ja kuormavastusten välillä on:

$$R = l \cdot r \quad (16)$$

$$R_{2,5 \text{ mm}^2} = l_{2,5 \text{ mm}^2} \cdot r_{2,5} = \frac{4 \text{ m}}{1000} \cdot 8,770 \Omega / \text{km} = 0,03508 \Omega$$

$$R_{1,5 \text{ mm}^2} = l_{1,5 \text{ mm}^2} \cdot r_{1,5} = \frac{1,5 \text{ m}}{1000} \cdot 14,620 \Omega / \text{km} = 0,02193 \Omega$$

$$R_{\text{tot}} = R_{2,5 \text{ mm}^2} + R_{1,5 \text{ mm}^2} = 0,03508 \Omega + 0,02193 \Omega = 0,05701 \Omega$$

Kaapeleiden kokonaisresistanssin ja suurimman sallitun virran avulla voidaan ratkaista häviöteho kaavan 17 avulla:

$$P_h = 3 \cdot R \cdot I^2 \quad (17)$$

$$P_h = 3 \cdot 0,05701 \Omega \cdot (8 \text{ A})^2 = 10,9 \text{ W}$$

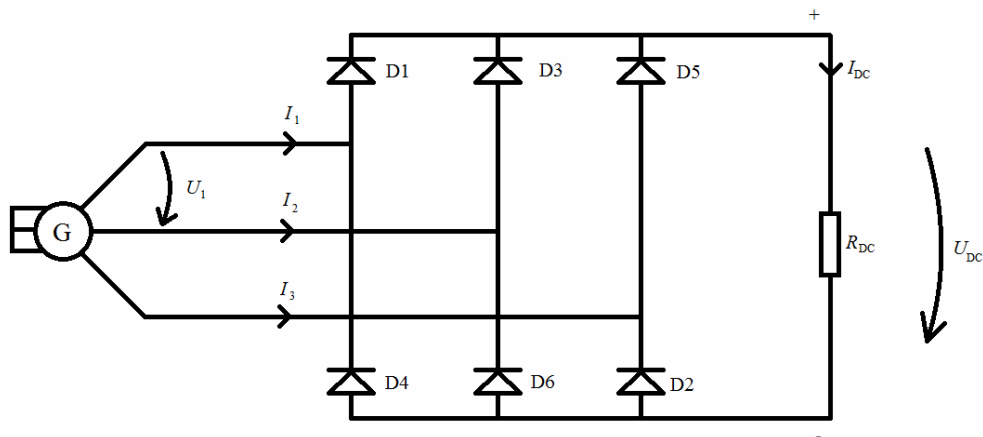
Johdinhäviöt eivät siis missään tapauksessa selitä poikkeamia valmistajan ilmoittamista tuloksista.

Generaattorin sisäisestä lämpötilasta johtuvat muutokset magneettivuossa ja staattori-resistansseissa ovat eräs mahdollinen seikka, jotka aiheuttavat tehon alenemista. Näiden vaikutuksiin on kuitenkin vaikea ottaa kantaa kun ei tiedetä, miten valmistaja on mittaukset suorittanut. Oletettavaa on kuitenkin, että nimellisteho olisi saavutettava normaalissa käyntilämpötilassa olevalla koneella.

Suoranaista syytä poikkeaviin tuloksiin ei kyetty osoittamaan, joten mittaustulokset lähetettiin Axco Motorssille tutkittavaksi. Valmistajalta saadun vastauksen mukaan teknisistä tiedoista poikkeavat arvot johtuvat siitä, että tutkittava generaattori on räätälöity invertterikäyttöä varten asentamalla koneen sisälle ilmaväliä kasvattavia välilevyjä. Ilmavälin kasvaminen muuttaa koneen ominaisuuksia.

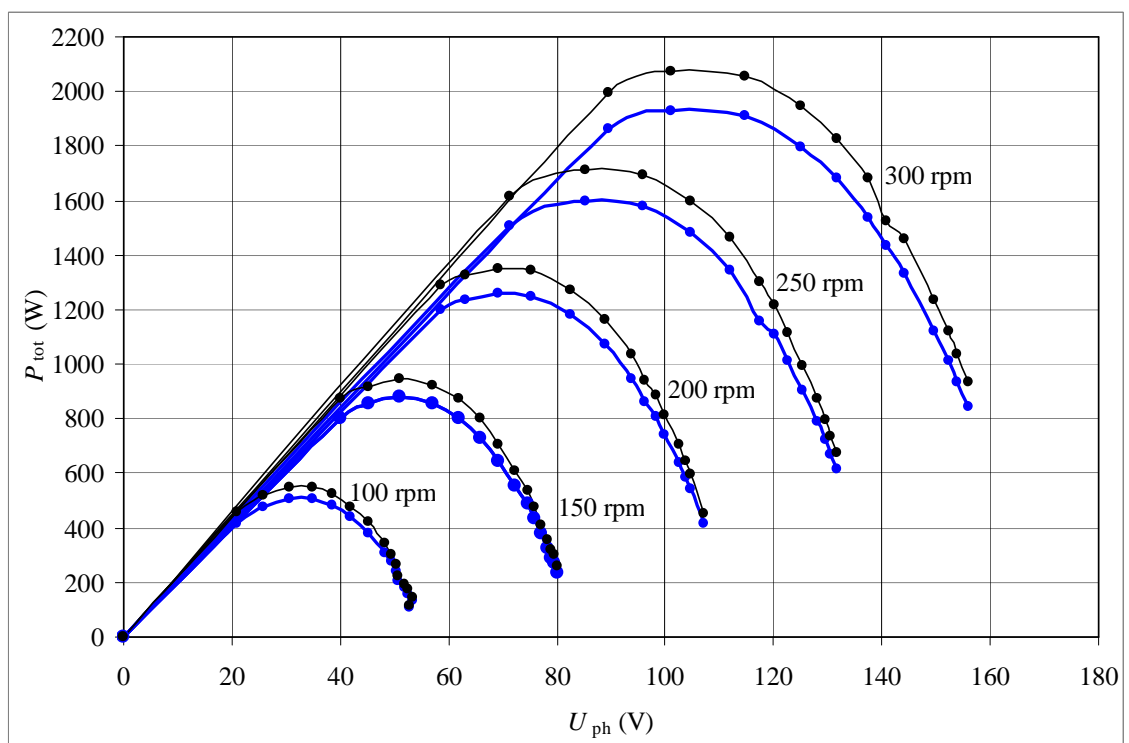
#### 5.3.4 Kuormitusmittaus tasasuuntaussiltaa ja resistiivistä kuormaa käyttäen

Seuraavassa vaiheessa tutkittiin miten konetta voidaan kuormittaa tasasuuntaavan diodisillan kautta. Mittauksissa käytettiin laboratoriossa olevaa diodisiltaa. Mittauskytkentä on esitetty kuviossa 14. Kytkennästä mitattiin AC-puolen pääjännite ja kaikki vaihevirrat sekä DC-puolen jännite ja virta. Kaikki arvot mitattiin yleismittareilla käyttäen  $DC+AC_{RMS}$  -mittausta.



KUVIO 14. Tasasuuntausmittauksen kytkentä

Tasasuuntaussillalla suoritettun kuormituskokeen tulokset on esitetty kuviossa 15 tehokäyrien muodossa. Tarkemmin tulokset sekä mittauskytkentä löytyvät liitteen 6 taulukoista. Tulosten perusteella diodisillan hyötysuhde on n. 92%, mikä vaikuttaa kovin alhaiselta. Hyötysuhteen heikkous johtunee osittain generaattorin induktiivisuuden vaikutuksista diodisillan kommutointiin. Vaihtosähköpuolen induktiivisuus lisää kommutoinnista johtuvaa tasajännitteen keskiarvon alenemaa (Mohan, Undeland & Robbins, 106–108). Myös yleismittareiden kyky säilyttää tarkkuutensa runsaasti yliaaltoja sisältävissä mittauksissa nousee erääksi tuloksiin vaikuttavaksi seikaksi.



KUVIO 15. Tehokäyrät tasasuuntausmittauksesta. Mustalla (ohut viiva) AC-puolen kokonaisteho ja sinisellä (paksu viiva) DC-puolen teho

### 5.3.5 Kompensointikondensaattorin mitoitus ja kuormituskoe

Kuten aiemmin todettiin, on generaattorista mahdollista saada enemmän pätötehoa kytkeällä kuorman rinnalle kompensointikondensaattorit. Koska generaattoria ei saa yli-kompensoida, oli aluksi määritettävä generaattorikäytön normaalin käyttötilan suurin taajuus. Käytön suurin sallittu kierrosnopeus on valmistajan mukaan passiivisella kuormalla 300 rpm, jolloin taajuus on 25 Hz ja aktiivisella (esim. taajuusmuuttajakuormalla)

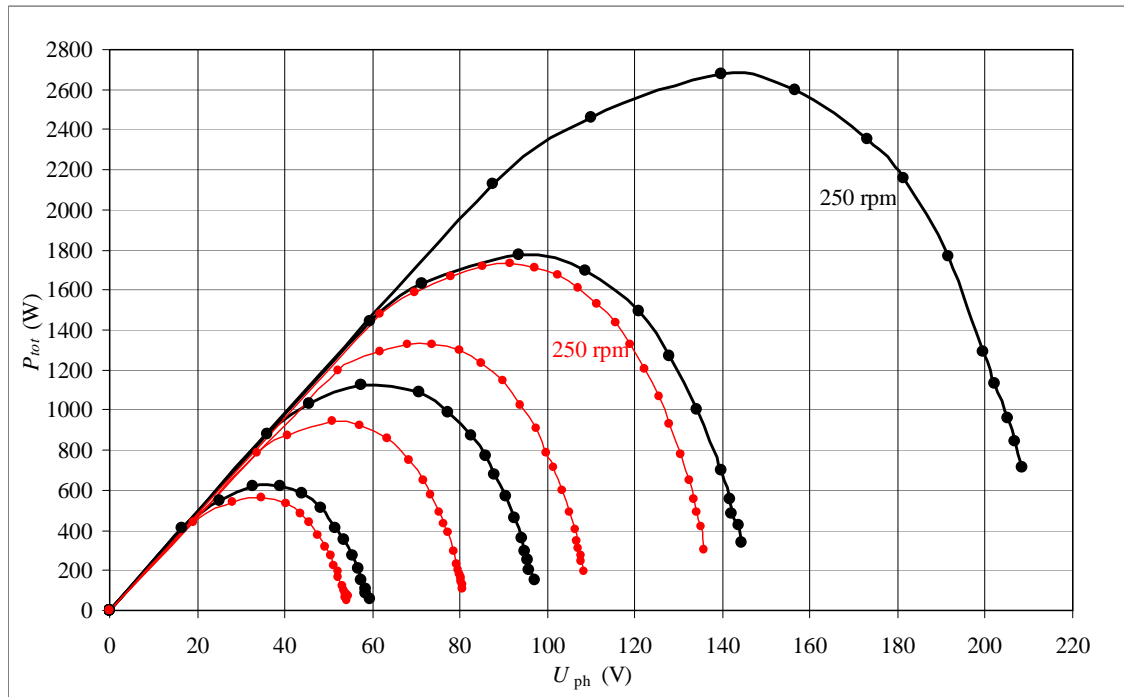
400 rpm, jolloin taajuus on 33,4 Hz. Kapasitanssimitoitus tehtiin erikseen molemmille tilanteille ratkaisemalla kapasitanssin arvo kaavasta 18 käyttäen induktanssin  $L$  arvona valmistajan ilmoittamaa  $L_s$  arvoa ja resonanssitaajuutena  $f_0$  suurimmasta sallitusta kierrosnopeudesta riippuvaa taajuutta:

$$C = \frac{1}{(2 \cdot \pi \cdot f_0)^2 \cdot L} \quad (18)$$

$$C_{25\text{Hz}} = \frac{1}{(2 \cdot \pi \cdot 25\text{Hz})^2 \cdot 0,12\text{H}} = 337,7\text{ }\mu\text{F}$$

$$C_{33,4\text{Hz}} = \frac{1}{(2 \cdot \pi \cdot 33,4\text{Hz})^2 \cdot 0,12\text{H}} = 189,2\text{ }\mu\text{F}$$

Laboratoriossa kapasitanssin arvoksi asetettiin 231  $\mu\text{F}$ , koska se oli laitteistolla helposti saavutettavissa ja omasi riittävän eron suurimpaan sallittuun 300 rpm nopeuden kapasitanssiin. Mittaustulokset on esitetty kuviossa 16. Kuvioista voidaan nähdä hyvin kondensaattorin vaikutus. Mittauksissa kävi kuitenkin ilmi, että induktansseja ei ole hyvä kompensoida näin voimakkaasti, koska generaattorin momentti ja virrat kasvoivat liian suuriksi, mistä johtuen 300 rpm nopeudella ei ollut mahdollista suorittaa mittauksia. Tärkeintä oli kuitenkin havaita, että generaattorista todellakin on mahdollista saada reilusti enemmän pätötehoa, kun kuorman rinnalle kytketään generaattorin staattori-induktansseja kompensoivat kondensaattorit.



KUVIO 16. Tehokäyrät, kun kytkentään on lisätty kondensaattorit (musta) ja ilman kondensaattoreita (punainen)

Seuraavaksi pyrittiin määrittämään kapasitanssille sopivampi arvo. Valmistajan antamissa teknisissä tiedoissa (liite 3, 4) todettiin aktiivisella kuormalla varustetussa käytössä pätötehon osuuden olevan 3 kW ja näennäistehon olevan 3,1 kVA. Samaisessa taulukossa todettiin pääjännitteen tehollisarvon olevan täydellä kuormalla 250 V. Näiden avulla oli mahdollista ratkaista valmistajan käyttämä kapasitanssin suuruus loistehon kautta.

$$Q = \sqrt{S^2 - P^2} = \sqrt{(3,1 \text{ kVA})^2 - (3,0 \text{ kVA})^2} = 781 \text{ VAr} \quad (19)$$

Loistehosta oli mahdollista ratkaista kondensaattorin reaktanssi.

$$X_c = \frac{U_{ph}^2}{Q_{ph}} = \frac{250 \text{ V} / \sqrt{3}}{781 \text{ VAr} / 3} = 80,036 \Omega \quad (20)$$

Kondensaattorin kapasitanssi vaihetta kohti ratkaistiin käyttäen taajuutena valmistajan antamaa kyseisen käyttötilan maksimikierrosnopeutta 400 rpm.

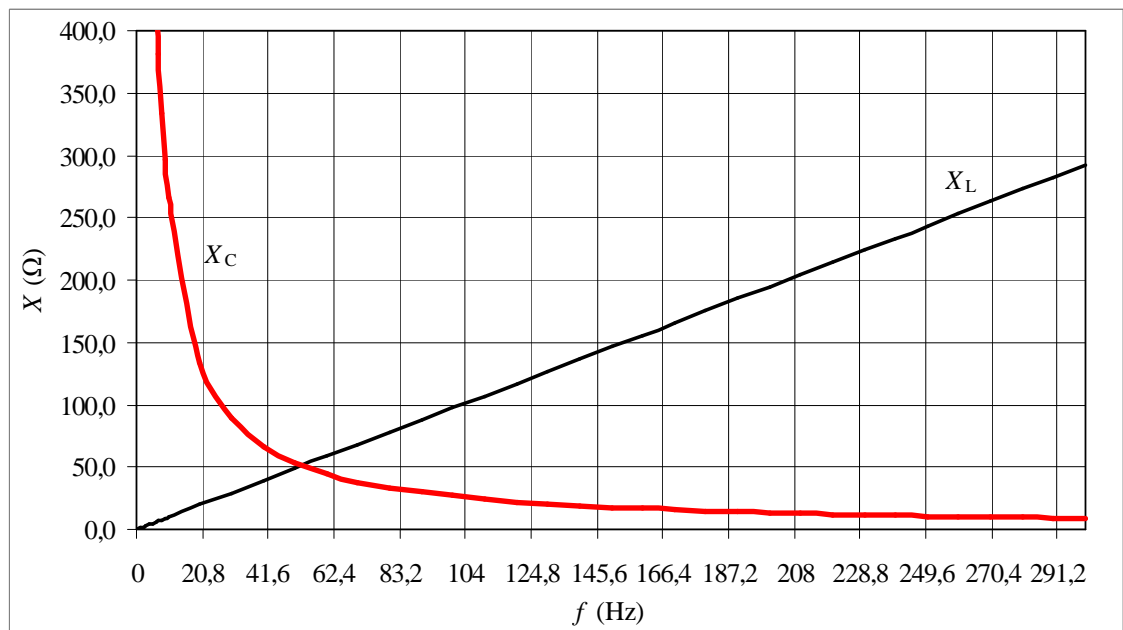


$$X_c = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot C} \quad (21)$$

$$\Rightarrow C = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot X_c} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 33,4 \text{ Hz} \cdot 80,036 \Omega} = 59,5 \mu\text{F}$$

Näin ollen optimaalinen vaihekohtainen kapasitanssi valmistajan antamien teknisten tietojen perusteella laskettuna on 59,5  $\mu\text{F}$ . Laboratoriossa käytettiin mittauksissa kapasitanssin arvoa 59,7  $\mu\text{F}$ . Kuviossa 17 on esitetty piirin induktiivisen ja kapasitiivisen reaktanssin käyttäytyminen generaattorin taajuuden funktiona taajuusalueella 0–300 Hz. Staattorikäämeistä johtuvan induktiivisen reaktanssin käyrä noudattelee kaavaa 22 ja kondensaattoreista johtuvan kapasitiivisen reaktanssin käytä kaavaa 21.

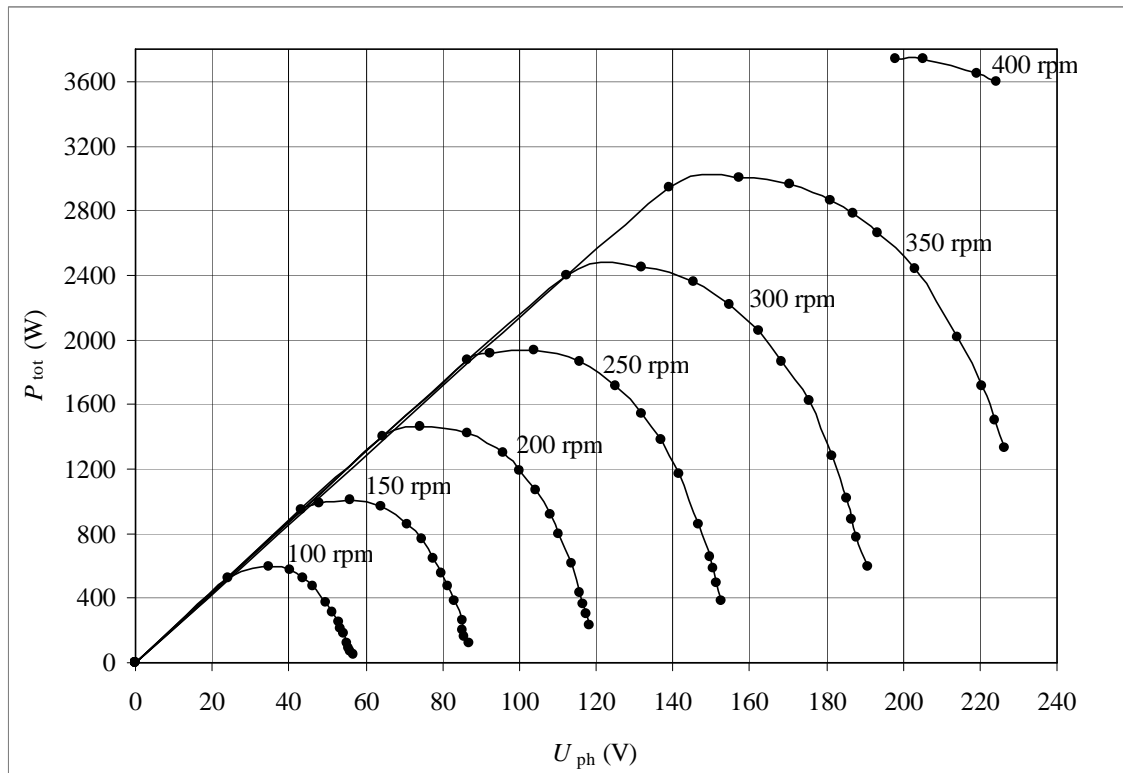
$$X_L = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L \quad (22)$$



KUVIO 17. Piirin reaktanssien käyttäytyminen – punaisella kapasitiivinen (paksu viiva) ja mustalla induktiivinen (ohut viiva) reaktanssi

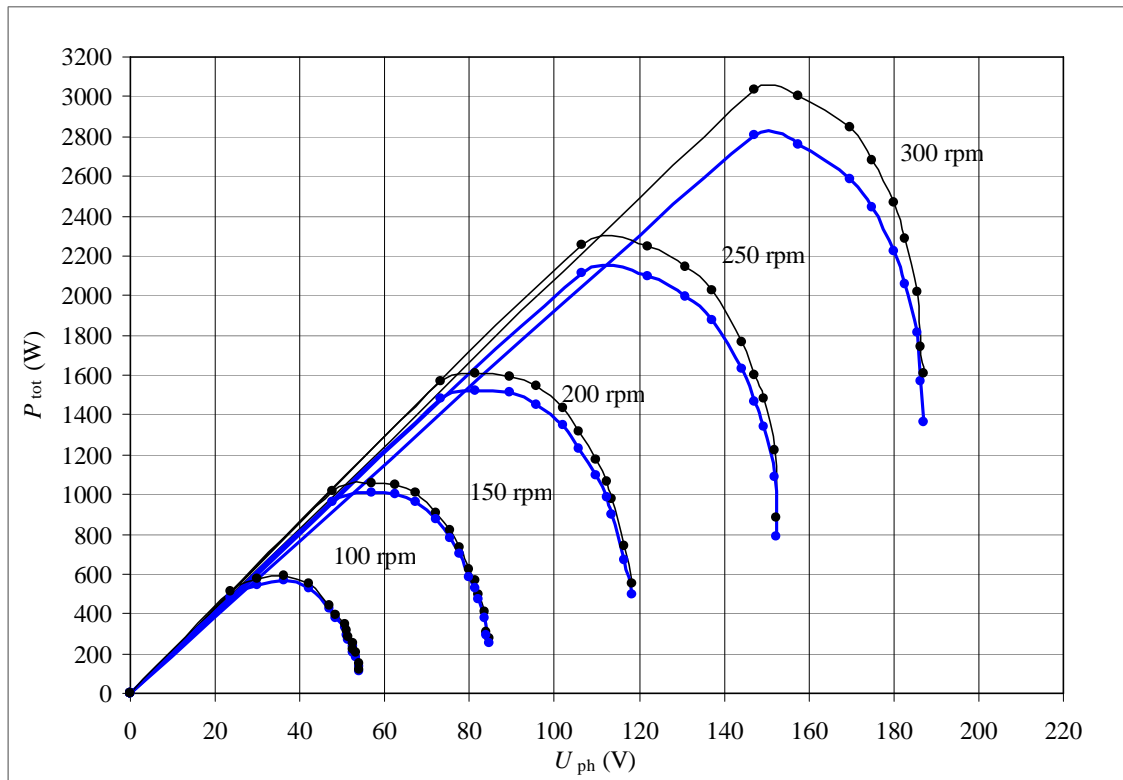
Mittaukset ilman diodisiltaa suoritettiin kierrosnopeuksille 100 rpm – 400 rpm. Tarkka mittauskytkentä sekä mittau tulokset taulukkomuodossa on esitetty liitteessä 7. 400 rpm nopeudella kuormaresistanssin kokoa tuli rajoittaa, koska suurilla resistanssin arvoilla jännite nousi liian suureksi kuormavastukselle ja huipputehon jälkeen virta nousi nope-

asti yli valmistajan salliman rajan. Tästä johtuen kuviossa 18 oleva 400 rpm käyrä on kovin lyhyt.



KUVIO 18. Tehokäyrät kun kuorman rinnalle on kytketty 59,7  $\mu$ F kondensaattorit

Kondensaattoreiden kytkemisellä kuorman rinnalle saadaan siis selvästi nostettua generaattorin pätötehotuotantoa, koska kondensaattorit avustavat generaattorin kestopäätteen magnetointia. Seuraavaksi piiriin kytkettiin diodisilta kuorman ja generaattorin väliin ja suoritettiin mittaukset uudelleen kierrosnopeuksilla 100 – 350 rpm. 400 rpm mittaus oli jätettävä pois, koska DC-jännite nousi liian suureksi kuormavastuksille. Mittauksen tulokset on esitetty kuviossa 19 ja liitteessä 8. Liitteestä 8 löytyy myös tarkka mittauskytkentä.



KUVIO 19. Tehokäyrät tasasuunnatulla resistiivisellä kuormalla  $59,7 \mu\text{F}$  kondensaattorit kytkettynä – mustalla (ohut viiva) AC-puolen kokonaisteho ja sinisellä (paksu viiva) DC-puolen teho

Verrattaessa kuvioden 18 ja 19 tehokäyriä, voi huomata AC-tehon nousevan diodisillan lisäämisen myötä melko paljon, varsinkin suurilla kierrosnopeuksilla. Esimerkiksi 250 rpm nopeudella voi todeta diodisillan lisäävän AC-pätötehoa lähes 300 W. Samaa ilmiötä ei ollut havaittavissa mittauksissa, jotka suoritettiin ilman kapasitansseja (kuviot 12 ja 15). Sillan hyötysuhde kapasitanssi kytkettynä oli noin 94 %, mikä tukee ilman kapasitanssia tehtyjen mittausten yhteydessä todettua generaattorin induktanssien vaikutusta kommutoinnin aiheuttamaan tasajännitteen keskiarvon laskuun. Vaihtosähköpiirin induktiivisuuden laskiessa tasajännitteen alenema siis pienenee.

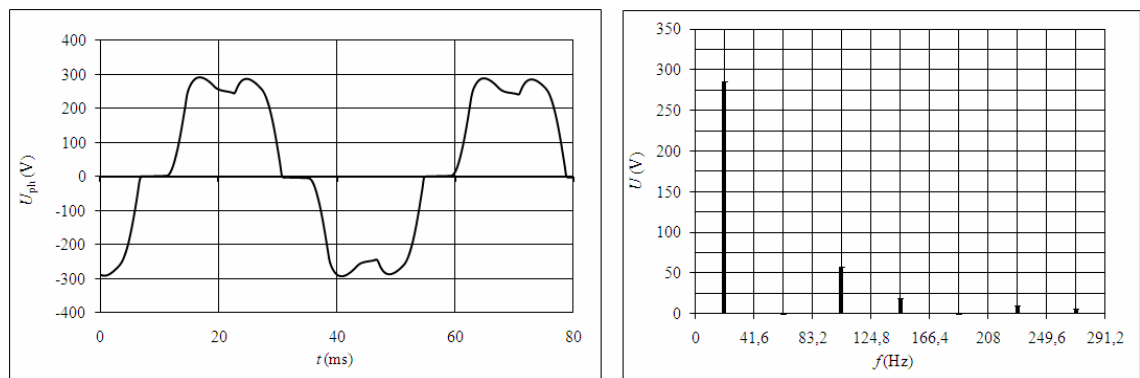
Kondensaattoreiden kytkemisen myötä syntyneen tehonousun syy paljastuu, kun tutkii oskilloskoopilla jännitteen ja virran käyrämuotoja piirin eri osissa, kondensaattoreiden kanssa ja ilman. Oskilloskooppitutkimukset on tehty taulukon 8 mukaisissa tilanteissa. Kytketyt kapasitanssit olivat edelleen  $59,7 \mu\text{F}$  suuruisia.

# TAULUKKO 8. Oskilloskooppimittauksen tutkimustilanteet

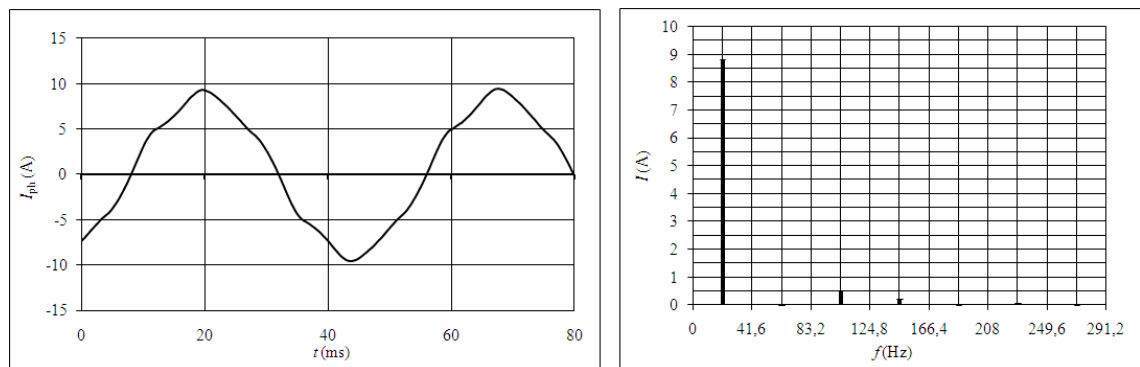
	$n$	$U_1$	$U_{ph}$	$I_{ph}$	$U_{DC}$	$I_{DC}$	$R_{DC}$	$U_C$	$I_C$	$I_{gen}$	$P_{tot}$
	rpm	V	V	A	V	A	ohm	V	A	A	W
Kapasitanssi kytketty	250	208,56	120,4	6,163	260,92	8,019	33	122,25	1,51	6,350	2226
Ei kapasitanssia	250	177,38	102,4	5,002	215,86	6,603	33	-	-	5,010	1537

Oskilloskooppitutkimuksessa saatuja käyrämuotoja ja kyseisten käyrämuotojen Fourier-analyysin tuloksia on esitelty kuvioissa 20 – 26. Vertaamalla kuvioita 20 ja 25, voi havaita jännitteen huippuarvon putoavan ilman kondensaattoreita lähes 50 V.

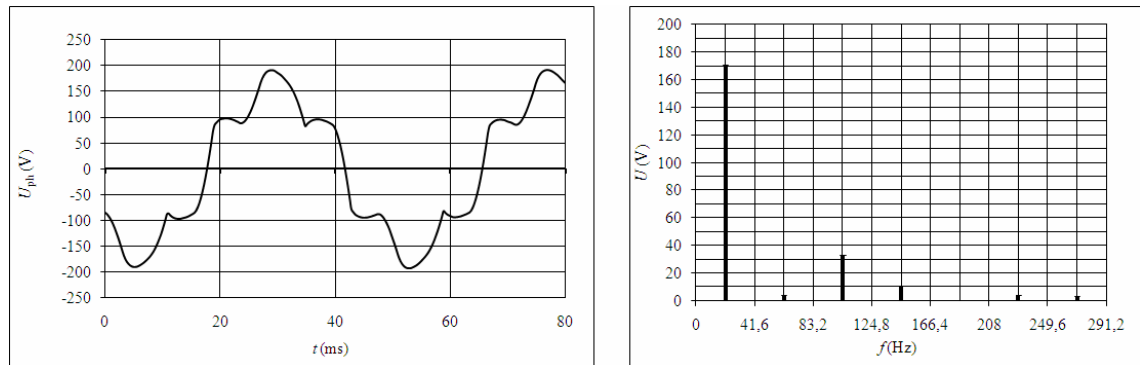
Kuviosta 23 voi nähdä, että diodisillan synnyttämät harmoniset yliaallot näkevät kapasitanssin reaktanssin pienempänä (vrt. kuvio 17) kuin perusaalto, jolloin harmonisten komponenttien virta kasvaa suureksi. Harmonisten komponenttien virta alkaa pumpata jännitettä korkeammaksi, mikä mahdollistaa suuremman pätötehon. Piirissä esiintyy erityisesti viidettä, seitsemättä ja yhdeksäntoista yliaaltoja.



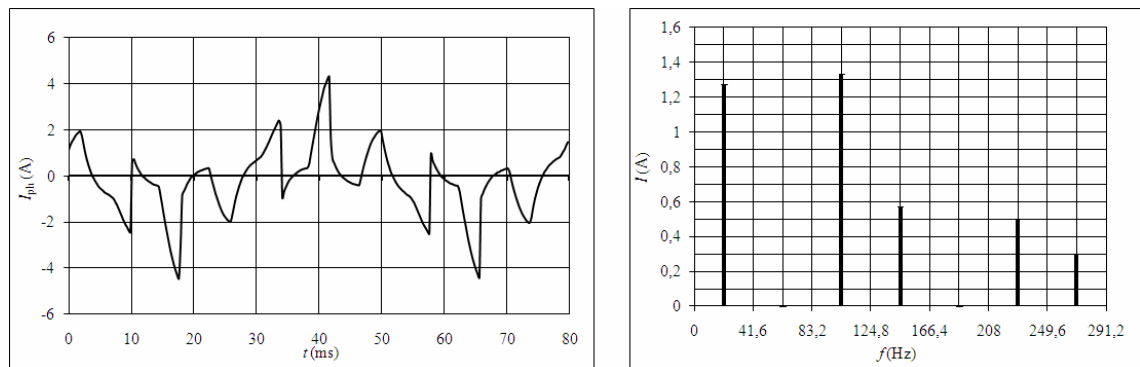
KUVIO 20. Generaattorin vaihejännitteen käyrämuoto ja Fourier-komponentit, kun kondensaattorit on kytkettynä



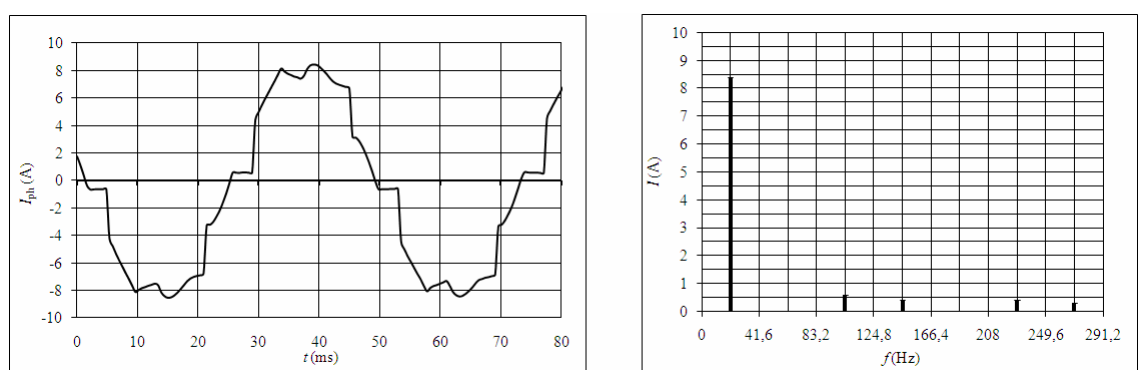
KUVIO 21. Generaattorin vaihevirran käyrämuoto ja Fourier-komponentit, kun kondensaattorit on kytkettynä



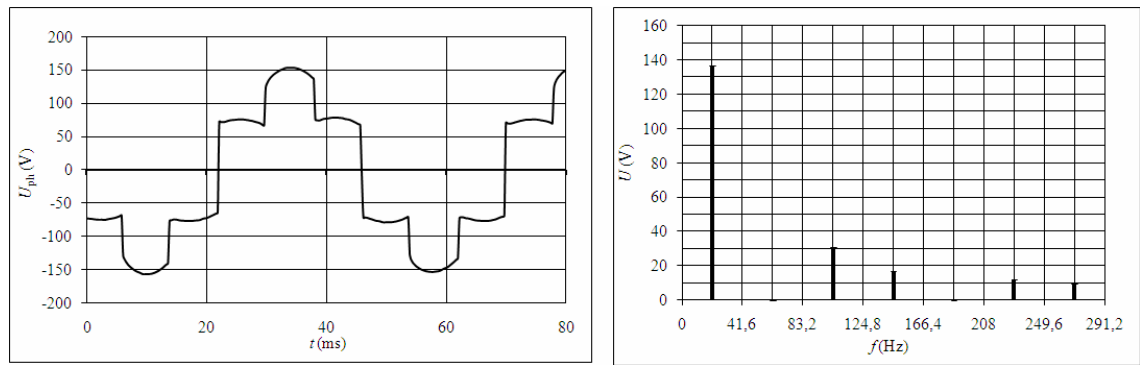
KUVIO 22. Kondensaattoreiden ja diodisillan vaihejännitteen käyrämuoto ja Fourier-komponentit, kun kondensaattorit on kytketty



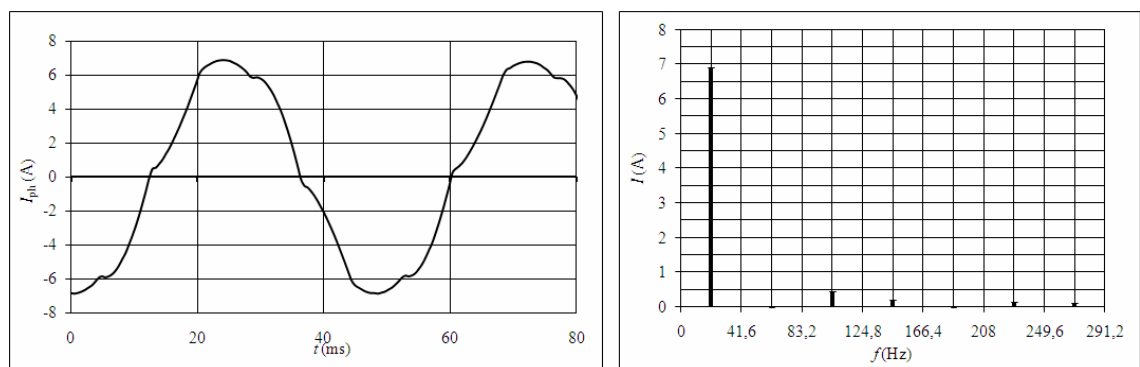
KUVIO 23. Kondensaattoreiden vaihevirran käyrämuoto ja Fourier-komponentit, kun kondensaattorit on kytketty



KUVIO 24. Diodisillan vaihevirran käyrämuoto ja Fourier-komponentit, kun kondensaattorit on kytketty



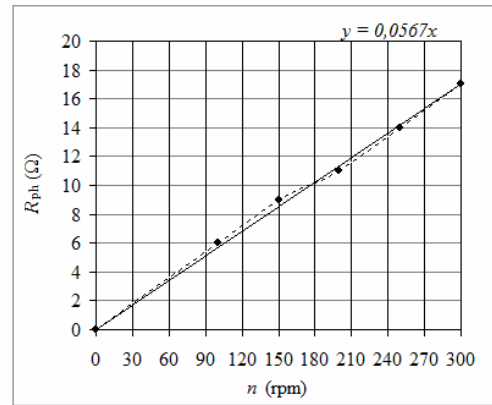
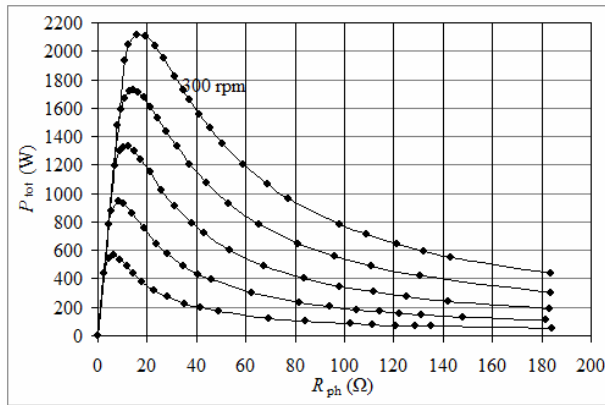
KUVIO 25. Generaattorin ja diodisillan vaihejännitteen käyrämuoto ja Fourier-komponentit, kun kondensaattoreita ei ole kytketty



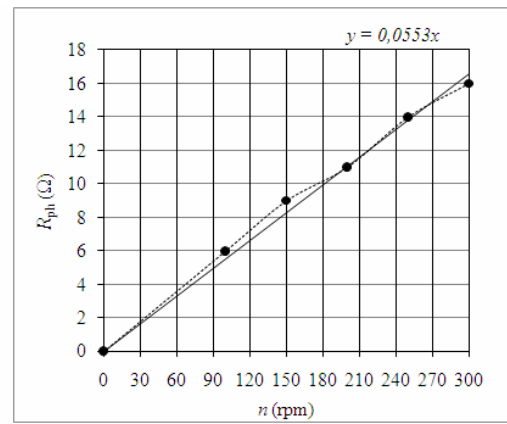
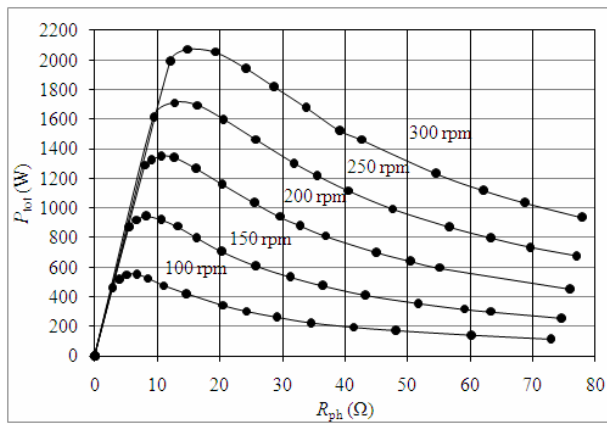
KUVIO 26. Generaattorin ja diodisillan vaihevirran käyrämuoto ja Fourier-komponentit, kun kondensaattoreita ei ole kytketty

#### 5.4 Kuormituksen optimointi eri kierrosnopeuksilla

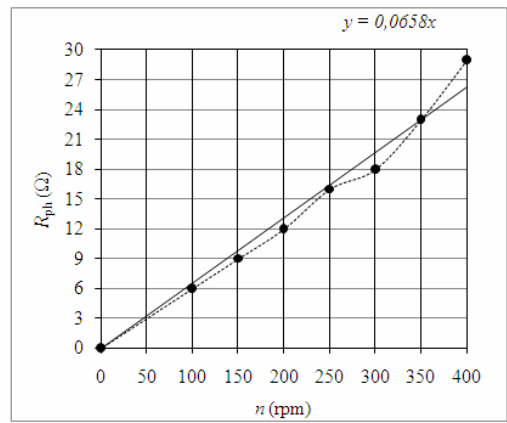
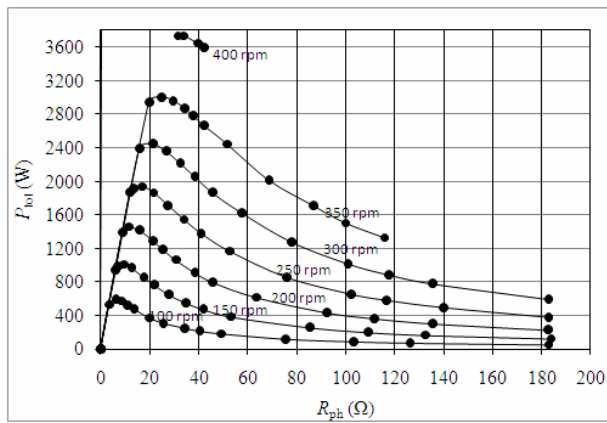
Koska aaltovoimalan generaattorin kierrosnopeus muuttuu jatkuvasti 0 rpm ja aallosta riippuvan suurimman kierrosnopeuden välillä, muuttuu myös optimaalinen kuormitusresistanssin arvo koko ajan. Tasaisella kierrosnopeudella tehtyjen tehomittausten perusteella on mahdollista piirtää tehokäyrät resistanssin funktiona eri kierrosnopeuksilla. Kun  $P = f(R_{ph})$  käyrien eri kierrosnopeuksia vastaavat huipputehon tuottavat kuormaresistanssiarvot sijoitetaan käyrälle  $R_{ph} = f(n)$  voidaan havaita pisteiden sijaitsevan nousuvalla suoralla. Kuvioissa 27 – 30 on esitetty generaattorin näkemät eri mittaustilanteiden  $P = f(R_{ph})$  käyrät ja näistä johdetut  $R_{ph} = f(n)$  suorat yhtälöineen.

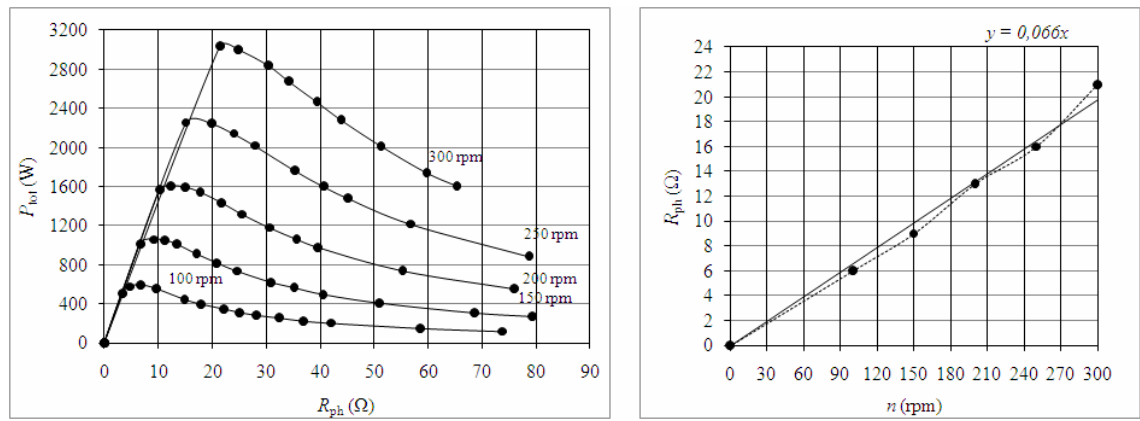


KUVIO 27. Resisttiivisen kuorman optimointi



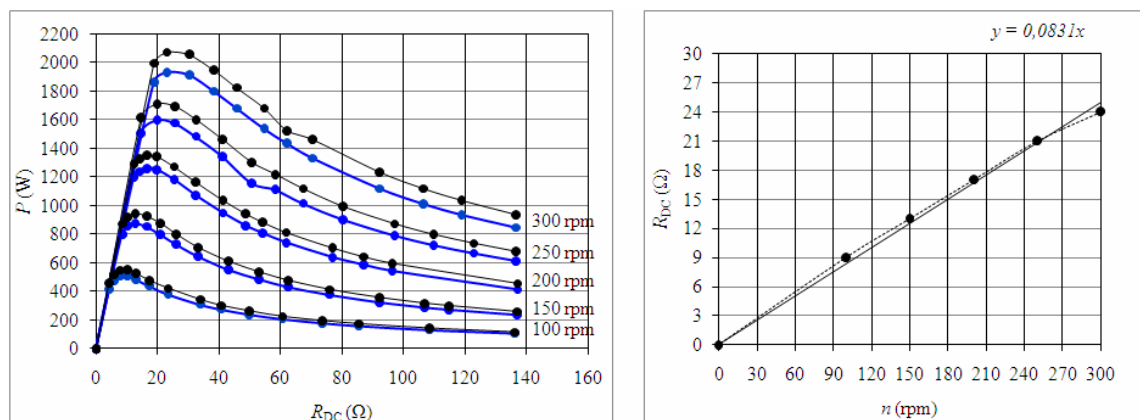
KUVIO 28. Tasasuunnatun reseristiivisen kuorman optimointi

KUVIO 29. Resisttiivisen kuorman optimointi, kun kuorman rinnalle on kytketty 59,7  $\mu$ F kondensaattorit



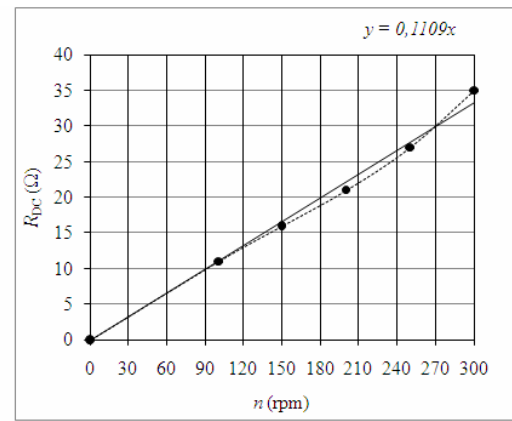
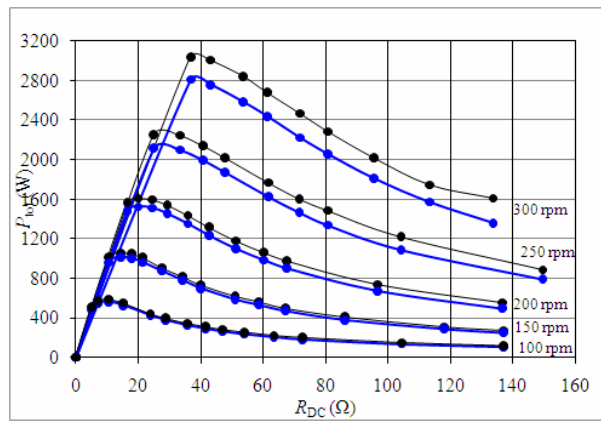
KUVIO 30. Tasasuunnatun resistiivisen kuorman optimointi kun tasasuuntaussillan rinnalle on kytketty 59,7  $\mu$ F kondensaattorit

Edellä esitetyt optimointisuorat on esitetty generaattorin kannalta. Tasasuuntaussillalla suoritetuissa mittauksissa optimointikäyrät DC-resistanssin kannalta ovat kuvioden 31 ja 32 mukaiset. Kyseiset optimointisuorat soveltuvat puhtaasti diodisillan tapaukseen.



KUVIO 31. DC-resistanssin optimointi ilman kondensaattoreita



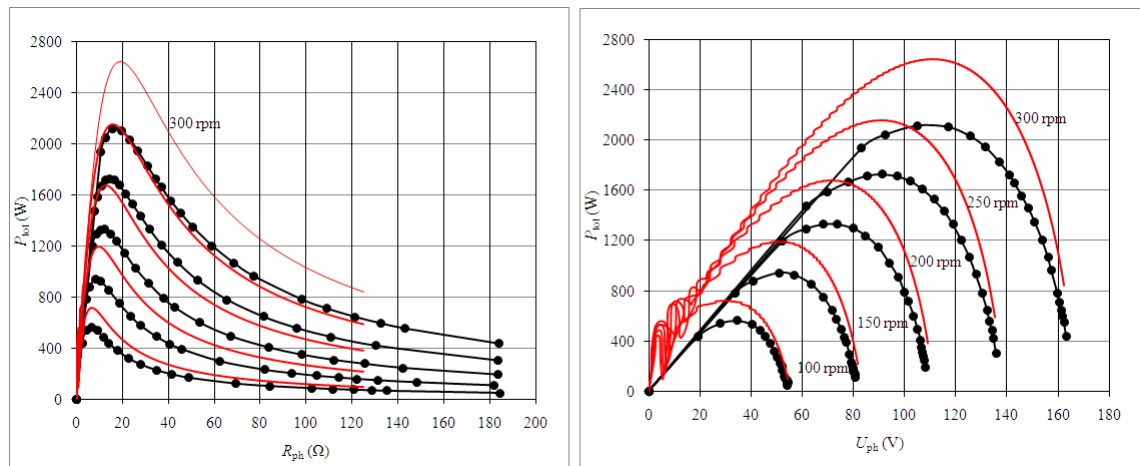


KUVIO 32. DC-kuormaresistanssin optimointi, kun tasasuuntaussillan rinnalle on kytetty 59,7  $\mu$ F kondensaattorit

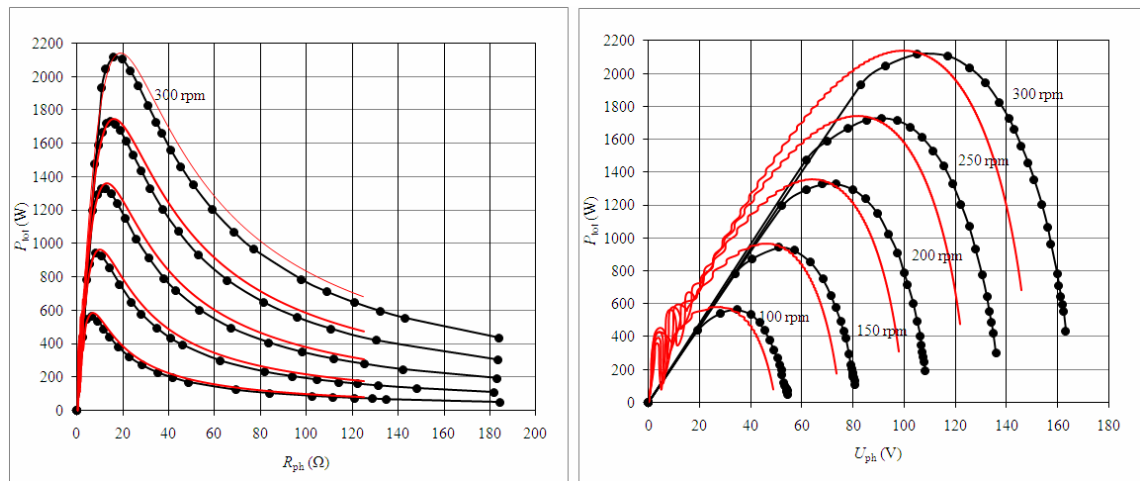
## 6 SIMULAATIOMALLIN ASETTELU

Kun kuormitusmittaukset resistiivisellä kuormalla oli tehty generaattorille, oli näiden tulosten pohjalta hyvä lähteä muokkaamaan simulaatiomallin parametrejä siten, että mallilla piirretty tehokäyrät alkoivat vastata mitattuja. Simulointia kokeiltiin aluksi käyttäen parametreina mittausten avulla laskettuja ja valmistajan antamia arvoja (kuvio 33). Näillä arvoilla ei kuitenkaan saatu käyriä täsmäämään mitattuihin verrattuna. Tämän jälkeen arvoja lähdettiin muuttamaan yksi kerrallaan simulaatiomallissa ja haettiin kokeilemalla parhaiten mitattuja arvoja vastaavat arvot.

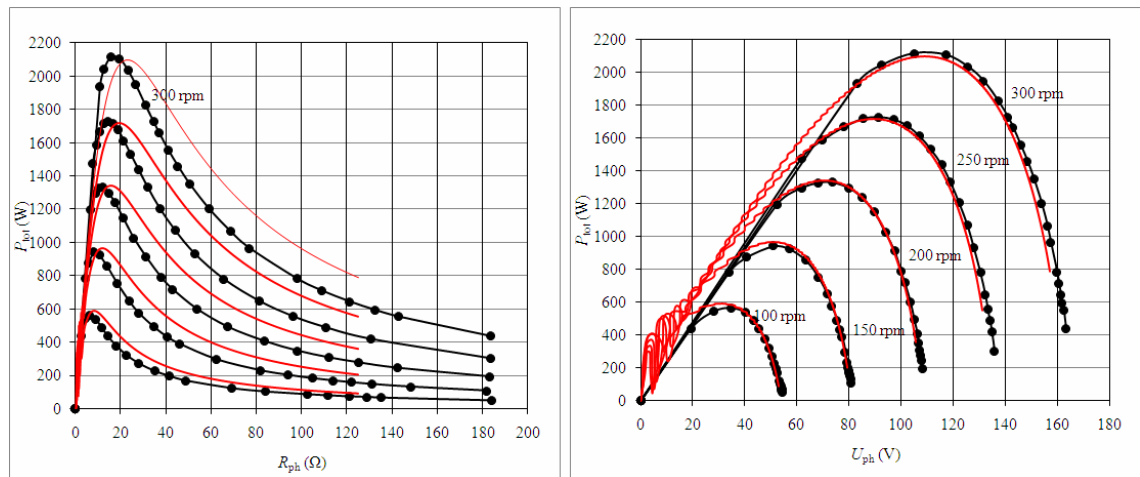
Oikeita arvoja etsiessä havaittiin, että kun tehokäyrät vastasivat toisiaan parhaiten kuormitusresistanssin mukaan (kuvio 34), oli tehokäyrä generaattorin vaihejännitteen funktiona poissa kohdaltaan ja päinvastoin (kuvio 35). Kuvioissa 33 – 35 näkyvät simulaatiokäyrän värähtelyt johtuvat simulaatiomallin aika-askeleesta, joka oli asetettava siten, että kun tulostiedot siirrettiin Exceeliin, oli mittauspisteiden määrä sellainen, että Excelillä pystyi vielä käsittelemään koko joukon kerrallaan. Lyhyemmällä aika-askeleella käyrän värähtely tasoittui. Taulukkoon 9 on kerätty kuvioden 33 – 35 simulaatioparametrit.



KUVIO 33. Simuloitujen ja mitattujen tehokäyrien vertailu mittausten perusteella lasketuilla ja valmistajan ilmoittamilla parametreilla



KUVIO 34. Simulaatiotulosten ja mitattujen tulosten vertailua, kun paras vastaavuus on haettu resistanssin suhteen



KUVIO 35. Simulaatiotulosten ja mitattujen tulosten vertailua, kun paras vastaavuus on haettu generaattorin vaihejännitteen suhteen

TAULUKKO 9. Simulaatiossa käytetyt parametrit

	Valmistajan ilmoittama arvo	Mittauksista laskettu arvo	Paras vastaavuus kuormaresistanssin mukaan	Paras vastaavuus vaihejännitteen mukaan
$R_s$	1,6 $\Omega$	2,001 $\Omega$	2,001 $\Omega$	2,001 $\Omega$
$L_d$	0,12 H	-	0,12 H	0,146 H
$L_q$	0,12 H	-	0,12 H	0,146 H
$p$	5	5	5	5
$\psi_{PM}$	-	1,50 Wb	1,35 Wb	1,46 Wb

Edellä käsitellyt eroavaisuudet johtuvat simulaatiomallin ominaisuuksista. Simulaatiomalli ei huomioi generaattorin kyllästymistä, ankkurireaktiota eikä komponenttien lämpötilaa. Kuormitussimuloinnissa on syytä käyttää kuormaresistanssin mukaan valittuja parametrejä. Jos tarkoituksena on puolestaan tutkia jännitteen käyttäytymistä, on parametrejä muutettava ja käytettävä jännitteen mukaan parhaiten sopivia. Tällöin resistanssin optimointikäyrät eivät enää päde, koska optimiresistanssit kasvavat, kuten kuviosta 35 voi havaita.

## 7 KOKEET MUUTTUVALLA KIERROSNOPEUDELLA

Generaattorille suoritettiin mittauksia muuttuvalla kierrosnopeudella, koska todellisessa aaltovoimalakäytössä kierrosnopeus sykkii aallon mukaisesti. Generaattoria pyöritettiin tietokoneohjatusti kahdella eri aaltoprofiililla. Molemmissa mittauksissa kuormaresistanssi oli optimoitu kyseisen profiilin suurimman kierrosnopeuden mukaan. Kaavaa 23 noudattavien tasasuunnattujen aaltoprofiilien ominaisuudet on esitetty taulukossa 10.

$$n = \left| n_{\max} \cdot \sin\left(2\pi \frac{t}{T}\right) \right| \quad (23)$$

TAULUKKO 10. Aaltoprofiilien ominaisuudet

Profiili	$n_{\max}$	$f_{\max}$	$T$	$f_{\text{aalto}}$
	rpm	Hz	s	1/s
Pienet aallot	90,8	7,57	2,9	0,345
Suuret aallot	256,7	21,39	4,8	0,208

### 7.1 Pienet aallot

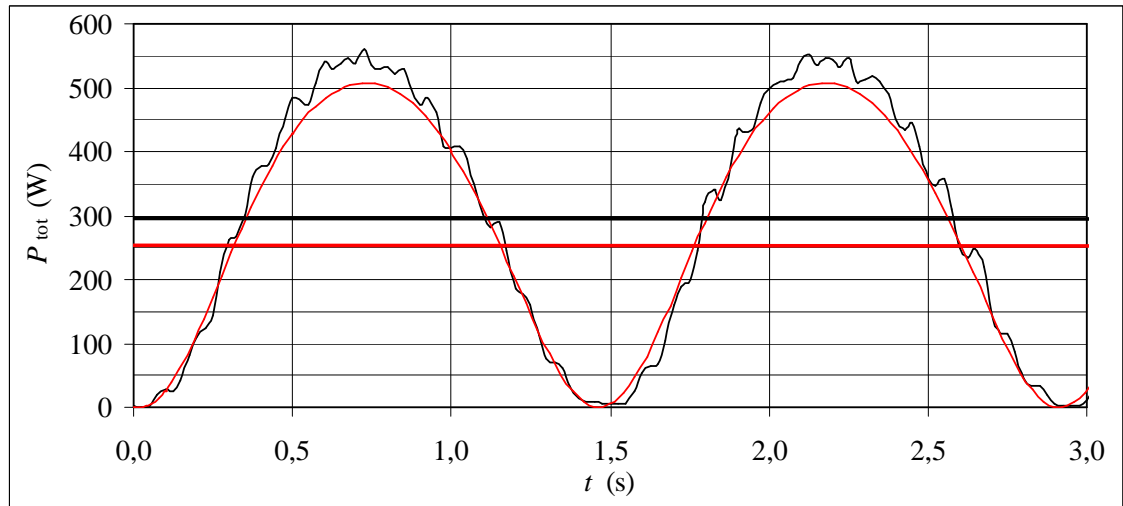
Pienten aaltojen synnyttämän suurimman kierrosnopeuden mukainen optimiresistanssi puhtaalla resistanssikuormalla on kuvion 27 mukaan (kaava 24):

$$y = 0,0567 \cdot x \Rightarrow R_{\text{ph}} = 0,0567 \frac{\Omega}{\text{rpm}} \cdot n_{\max} \quad (24)$$

$$R_{\text{ph}} = 0,0567 \frac{\Omega}{\text{rpm}} \cdot 90,8 \text{ rpm} = 5,15 \Omega$$

Generaattoria on siis kuormitettava 5,15  $\Omega$  kuormalla jokaista vaihetta kohti, jotta pienten aaltojen suurimmalla kierrosnopeudella saavutetaan suurin mahdollinen teho. Tämä mittaus suoritettiin laboratoriossa ja syntynyt tehokäyrä on esitetty kuviossa 36. Samaan kuvioon on lisätty simulaatiosta saatu tehokäyrä, kun parametreinä on käytetty parhaan vastaavuuden resistanssin mukaan antavia arvoja ja edellä laskettua kuormaresistanssia. Kuvioon on lisätty myös molempien tehokäyrien keskiarvon ilmaiseva trendiviiva.

Trendiviivoja tutkimalla voi havaita mittauksen keskitehon olevan 294 W ja simuloinnin keskitehon 253 W. Tämä tarkoittaa, että simulaatiomalli antaa pienillä aalloilla 13,9 % pienemmän tuloksen.



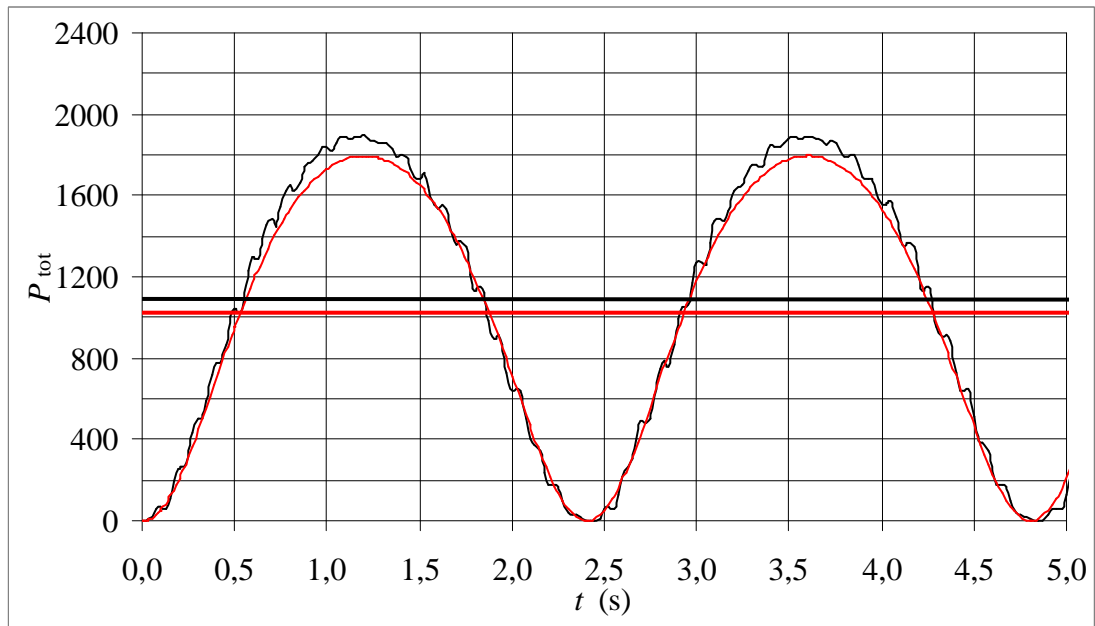
KUVIO 36. Pienten aaltojen tuottama sähköinen teho mitattuna (musta viiva) ja simuloituna (punainen viiva)

## 7.2 Suuret aallot

Suurten aaltojen synnyttämän suurimman kierrosnopeuden mukainen optimiresistanssi määritetään samoin kuin pienten aaltojen, eli kaavalla 24 suurinta syntyvää kierrosnopeutta käyttäen.

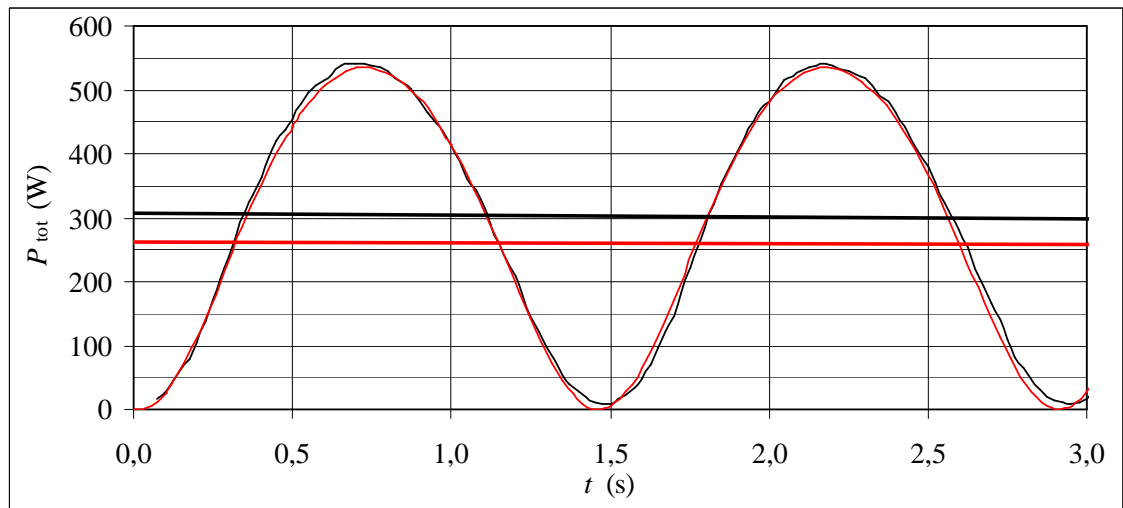
$$R_{ph} = 0,0567 \frac{\Omega}{\text{rpm}} \cdot n_{\max} = 0,0567 \frac{\Omega}{\text{rpm}} \cdot 256,7 \text{ rpm} = 14,55 \Omega \quad (24)$$

Suurten aaltojen tapauksessa suoritettiin samat tutkimukset kuin pienten aaltojen kohdalla, eli laboratoriossa ajettiin mittausajo edellä lasketulla kuormituksella ja simulaatiomallilla toteutettiin sama tilanne. Tulokset näkyvät kuviossa 37, johon on jälleen lisätty keskiarvoa osoittavat trendiviivat molempien tehokäyrien osalta. Trendiviivoja tutkimalla voi havaita mittauksen antavan keskitehon 1070 W, simulaatiomallin keskitehon ollessa 1020 W, eli 4,9 % pienempi kuin mittauksen tulos.

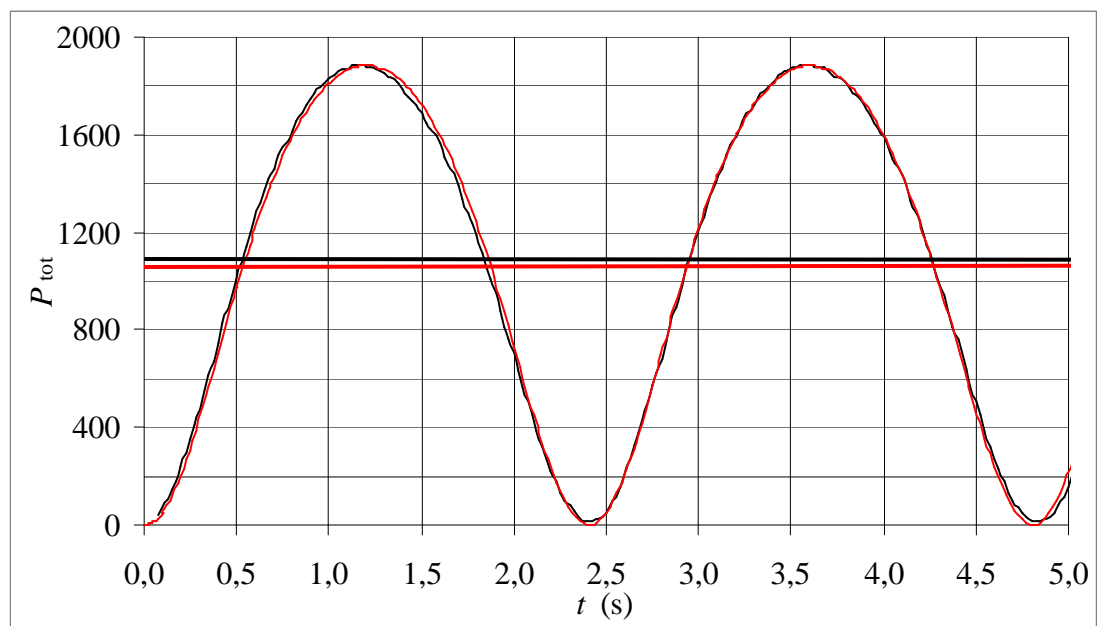


KUVIO 37. Suurten aaltojen tuottama sähköinen teho mitattuna (musta viiva) ja simuloituna (punainen viiva)

Edellä esitellyt tulokset saatiin käyttämällä parhaan vastaavuuden resistanssien suhteen vakionopeudella antaneita simulaatioparametrejä. Koska simulointitulosten keskitehot poikkesivat mittausten keskitehoista melko paljon, etenkin pienten aaltojen kohdalla, päädyttiin kokeilemaan jälleen parhaiden parametrien hakemista. Muuttamalla kestopagneettivuon parametri arvosta 1,35 Wb arvoon 1,38 Wb, saatiin pienten aaltojen simuloitu keskiteho (kuvio 38) tasolle 255 W, joka oli 12,9 % alhaisempi kuin mitattu. Suurten aaltojen kohdalla samoilla parametreillä simuloitu keskiteho (kuvio 39) oli 1063 W, joka oli vain 1,3 % alhaisempi kuin mitattu keskiteho. Kuvioissa 38 ja 39 on mitatun tehon käyrästä suodatettu värinää seitsemän pisteen liukuvalla keskiarvolla.



KUVIO 38. Pienten aaltojen tuottama sähköinen teho mitattuna (musta viiva, suodatettu 7 pisteen liukuvalla keskiarvolla) ja simuloituna (punainen viiva), kun on käytetty ke-  
stomagneettivuon arvoa 1,38 Wb



KUVIO 39. Suurten aaltojen tuottama sähköinen teho mitattuna (musta viiva, suodatettu 7 pisteen liukuvalla keskiarvolla) ja simuloituna (punainen viiva), kun on käytetty ke-  
stomagneettivuon arvoa 1,38 Wb

Simulaatio saatiin siis ke-  
stomagneettivuon arvoa muuttamalla toimimaan hyvin suurilla aalloilla, mutta pienillä aalloilla eroja mittaustuloksiin syntyy edelleen. Dynaamisia kuormitustilanteita tutkiessa olisi hyvä käyttää taulukon 11 parametrejä, jotka tuottavat etenkin suuremmilla aalloilla luotettavia tuloksia.



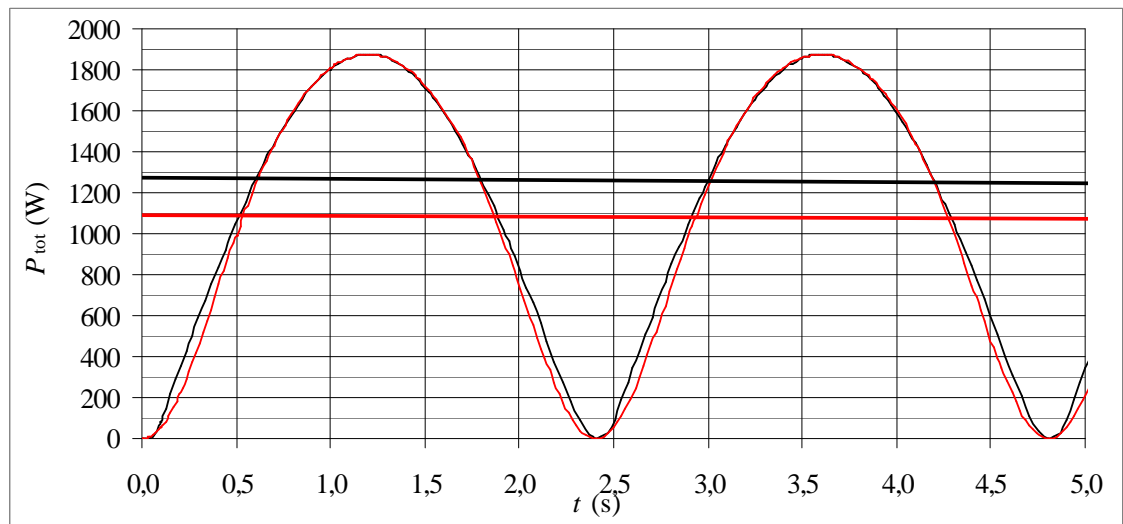
$L_d$	0,12 H
$L_q$	0,12 H
$R_s$	2,001 $\Omega$
$p$	5
$\Psi_{PM}$	1,38 Wb

TAULUKKO 11. Muuttuvanopeuksiselle käytölle soveltuvat parametrit (johdettu parhaan vastaavuuden resistanssin suhteen tuottavista parametreistä)

### 7.3 Aktiivisesti ohjattu kuorma muuttuvalla nopeudella

Jotta generaattorista saataisiin koko ajan maksimaalinen tehontuotto kierrosnopeudesta riippumatta, on kuormaa ohjattava aktiivisesti. Aktiivinen kuormanohjaus on muutenkin järkevää toteuttaa, koska aallot muuttuvat koko ajan. Laboratoriomittauksia ei ollut mahdollista suorittaa aktiivisesti säätävällä kuormalla tarkoitukseen sopivan laitteiston puuttuessa, mutta edellä tehtyjen suurimman kierrosnopeuden mukaan optimoitujen mittausten perusteella simulaatiomallin todettiin toimivan riittävän tarkasti, joten aktiivisesti optimoitua kuormaa oli mahdollista tutkia seuraavasti:

Simulaatiomalliin asetettiin kierrosnopeuden mukaan optimoituva kuormitus ja suoritettiin simulointi suurten aaltojen ajoprofiililla taulukon 11 generaattorin parametreja käyttäen. Simulaation tulos on esitetty kuviossa 40, johon on lisätty myös suurimman kierrosnopeuden mukaan optimoidun kiinteän kuorman simulaatiokäyrä. Samaan kuvioon on lisätty myös molempien tilanteiden keskitehoa mallintava trendiviiva. Trendiviivojen perusteella voi päätellä aktiivisen kuormaohjauksen tuottavan suurilla aalloilla 1244 W ja vakiokuormalla 1076 W, jolloin keskiteho aktiivisella kuormanohjauksella on 15,6 % suurempi kuin vakiokuormalla.



KUVIO 40. Aktiivisesti (musta viiva) ja suurimman kierrosnopeuden mukaan (punainen viiva) optimoidut tehokäyrät

## 8 JOHTOPÄÄTÖKSET JA POHDINTA

Työlle asetetut tavoitteet täyttyivät hyvin. Laboratorioon rakennettu mekaaninen kyt-kentä osoittautui toimivaksi ja sitä on mahdollista käyttää myös muissa pieninopeuksi-sissa käytöissä vaihtamalla generaattorin tilalle esimerkiksi moottori, tai käyttämällä kyseistä generaattoria moottorina. Mahdollisessa ylennysvaihekäytössä on kuitenkin huomioitava, että valitun vaihteen suurin sallittu kierrosnopeus on 4000 rpm, jolloin toision suurin sallittu pyörimisnopeus on 666 rpm.

Laboratoriossa suoritettujen mittausten perusteella saatiin määritettyä kuorman opti-mointisovitukset. Näitä optimointisovituksia käyttäen on mahdollista kuormittaa tutkit-tua generaattoria tehokkaasti ja viedä projektia sitä kautta eteenpäin.

Simulaatiomallin parametrit saatiin määritettyä puhtaan resistiivisen kuorman tapauk-seen. Muita tutkittuja kuormia ei käytetyllä simulaatiomallilla kyetty tutkimaan, koska malli ei mahdollistanut vielä resistiivistä kuormaa monimutkaisempien käyttöjen tutki-mista. Erityisesti tasasuuntaussillan simuloiminen kyseisellä mallilla on haasteellista. Jotta kaikkia kuormia olisi voitu simuloida, olisi malli tullut toteuttaa esimerkiksi Simu-linkin SimPower Systems kirjaston komponenteilla. Tätäkin keinoa kokeiltiin työn ai-kana, mutta tällöin simulointi muuttui todella hitaaksi ja mallin toiminta ei ollut toivo-tunlaista.

Tasaisella pyörimisnopeudella mitattujen tehokäyrien avulla määritetyt simulaatiopara-metrit osoittautuivat kestopagneettivuon arvoa muuttamalla toimiviksi myös muuttu-valla nopeudella suoritettujen mittausten simuloinnissa ja näin oli mahdollista simuloi-malla tutkia aktiivisen kuorman ohjauksen vaikutusta tuotettavaan keskitehoon. Keski-tehonnousun ollessa suuria aaltoja mallintavan aaltoprofiilin tapauksessa 15,6 %, on helppo todeta aktiivisen kuormanohjauksen olevan järkevä kehityssuunta. Tätä käsitystä vahvisti myös se tosiasia, että aallot muuttuvat koko ajan, joten maksimaalisen tehon tuottamiseksi kuormaa on joka tapauksessa säädettävä.

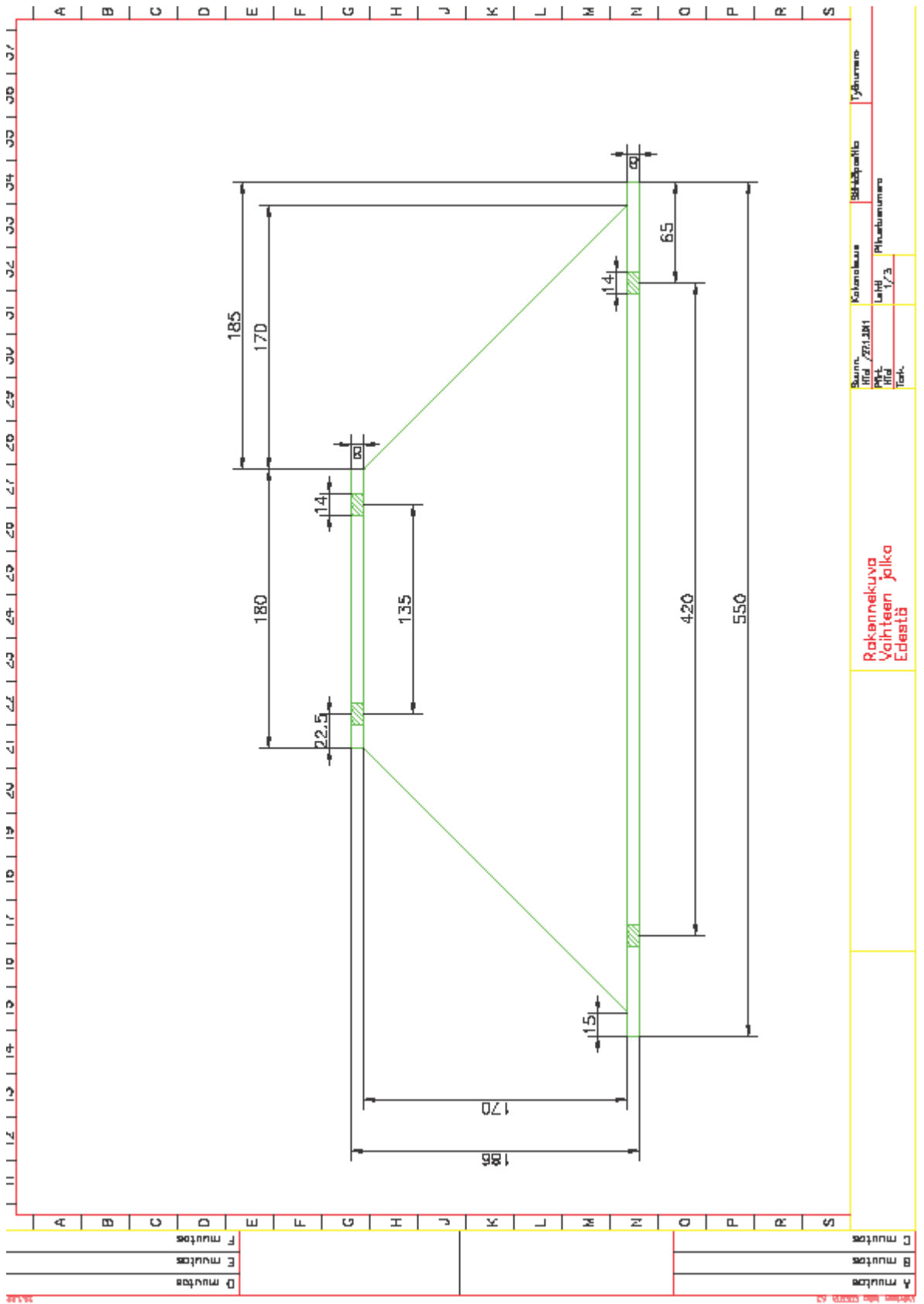
Jatkossa projektissa tulisi panostaa simulaatiomallin kehittämiseen, jotta voitaisiin si-muloida laitteiston käyttäytymistä kun kytkentään lisätään kapasitanssit ja/tai diodisilta

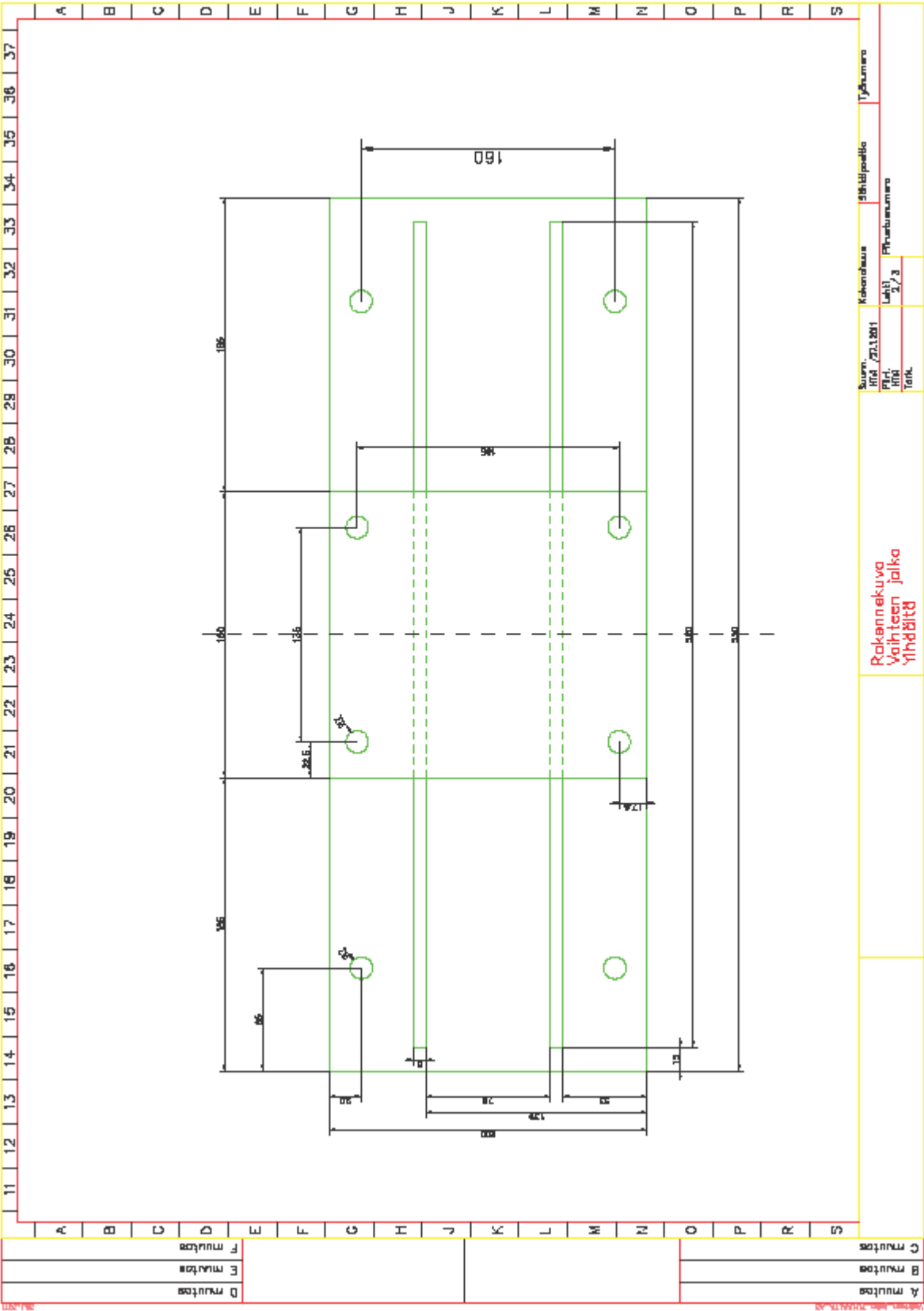
sekä tutkia DC-jännitteen tasoittamista ja sitä miten sykkivä teho saadaan järkevästi tasattua sekä syötettyä sähköverkkoon. Tätä kirjoitettaessa verkkovaihtosuuntaaja oli jo tulossa ja sitä kautta projekti oli astumassa taas askeleen eteenpäin. Myös toisen vastaavan tutkimuslaitteiston rakentaminen nykyisen rinnalle oli jo suunnitelmassa, jotta olisi mahdollista tutkia kahden eritahdissa olevan aaltovoimayksikön yhteistoimintaa.

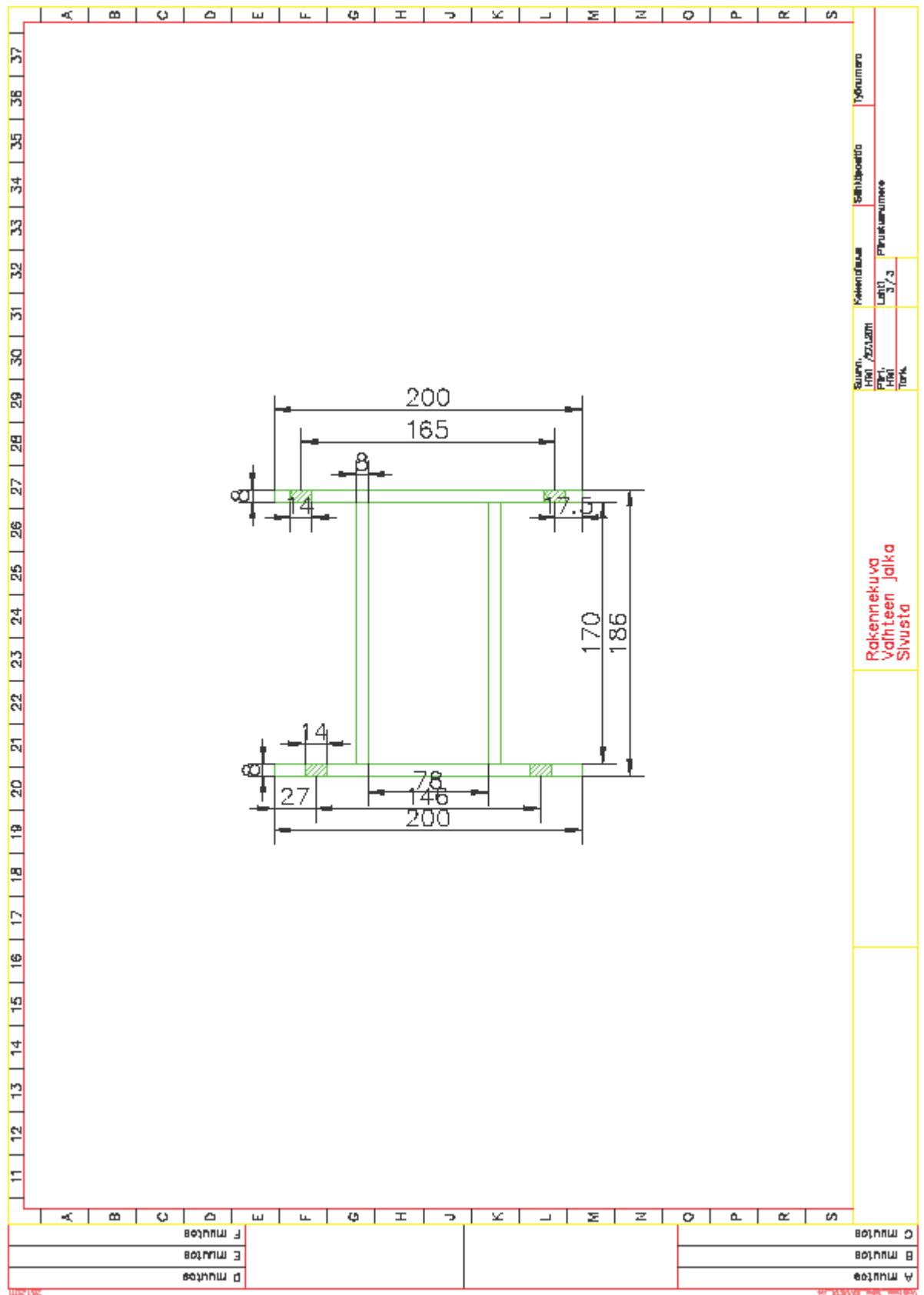
Kapasitanssien tarkempaa mitoitusta ei tässä työssä suoritettu, mutta tulevaisuudessa, kun simulaatiomalli kehittyy, on mahdollista tutkia mallin oikeellisuutta vertailemalla tuloksia tässä työssä esitettyihin kapasitanssimittausten tuloksiin. Kun malli vastaa tämän työn tuloksia, voidaan simuloimalla ryhtyä helposti etsimään sopivaa kapasitanssia parhaan hyödyn saamiseksi.

## LÄHTEET

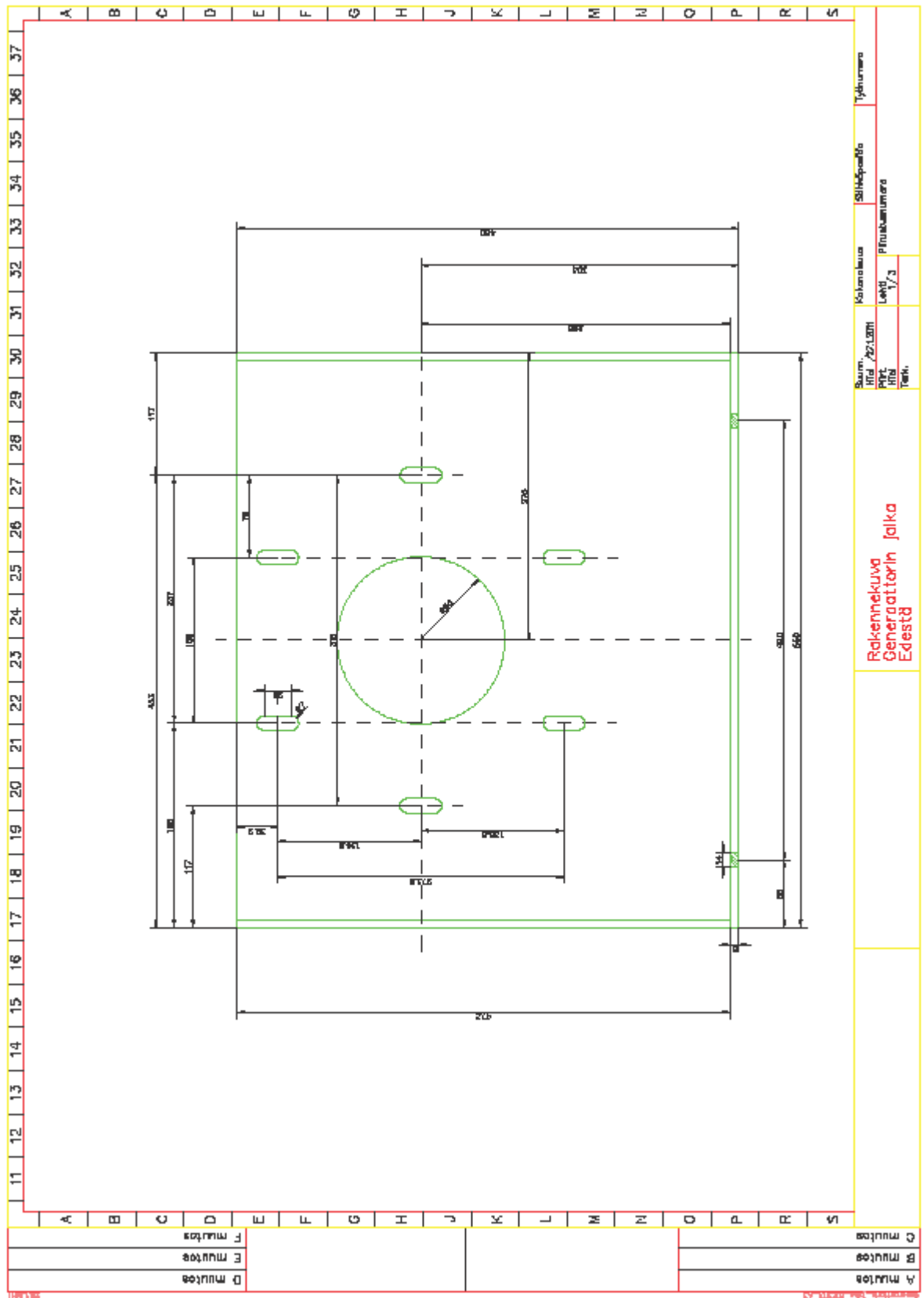
- AW-Energy. 2010. WaveRoller by AW-Energy. [www-sivu]. Luettu 17.2.2011. <http://www.aw-energy.com/concept.html>
- AXCO-Motors Oy. 2011. Aksiaalivuotekniikka. [www-sivu]. Luettu 28.2.2011. <http://www.axcomotors.com/aksiaalivuomoottori/aksiaalivuotekniikka.html>
- Cavagnino, A., Lazzari, M., Profumo, F. & Tenconi, A. 2000. Axial flux interior PM synchronous motor: Parameters identification and steady-state performance measurements. [PDF-tiedosto]. Luettu 3.3.2011. <http://www.ieee.org>
- Cruz, J. 2008. Ocean Wave Energy – Current status and future perspectives. Berlin Heidelberg: Springer Verlag.
- Gorman, S. F., Chen, C. & Cathey, J.J. 1988. Determination of permanent magnet synchronous motor parameters for use in brushless dc motor drive analysis. [PDF-tiedosto]. Luettu 2.3.2011. <http://www.ieee.org>
- Hietalahti, L. 2010. Muuntajat ja sähkökoneet –opetusmateriaali. Tammertekniikka 2010.
- Kinnunen, J. 2007. Direct-on-line axial flux permanent magnet synchronous generator static and dynamic performance. Lappeenrannan teknillinen yliopisto. Väitöskirja.
- Löyttynen, H. 2010. Suoravetoisen tuuliturbiinin generaattorin testisegmentin testaus. Saimaan ammatti-korkeakoulu. Opinnäytetyö.
- Mohan, N., Undeland, T.M. & Robbins, W.P. 2003. Power Electronics – Converters, Applications and Design. John Wiley & Sons, inc. United States of America.
- Parviainen, A. 2005. Design of axial-flux permanent-magnet low-speed machines and performance comparison between radial-flux and axial-flux machines. Lappeenrannan teknillinen yliopisto. Väitöskirja.
- Seppä, M. 1997. Kestomagneettikoneiden rakennevaihtoehdot hitaisiin käyttöihin. Lappeenrannan teknillinen yliopisto. Diplomityö.
- SEW-Eurodrive. 2010a. Catalog – Gear Units [PDF-tiedosto]. Luettu 25.1.2011. <http://www.sew-eurodrive.fi>
- Strömberg, S. 2011. Sähköpostikeskustelu 26.1.2011.
- Tcheslavski, G. 2008. Lecture 7: Synchronous machines. [PDF-tiedosto]. Luettu 2.3.2011. <http://www.ee.lamar.edu/gleb/power/Lecture%2007%20-%20Synchronous%20machines.pdf>
- Thorpe, T.W. 1999. An Overview of Wave Energy Technologies: Status, Performance and Costs. [PDF-tiedosto]. Luettu 10.2.2011. <http://www.wave-energy.net/index3.htm>
- World Energy Council. 2010. 2010 Survey of Energy Resources [PDF-tiedosto]. Luettu 15.2.2011. <http://www.worldenergy.com>

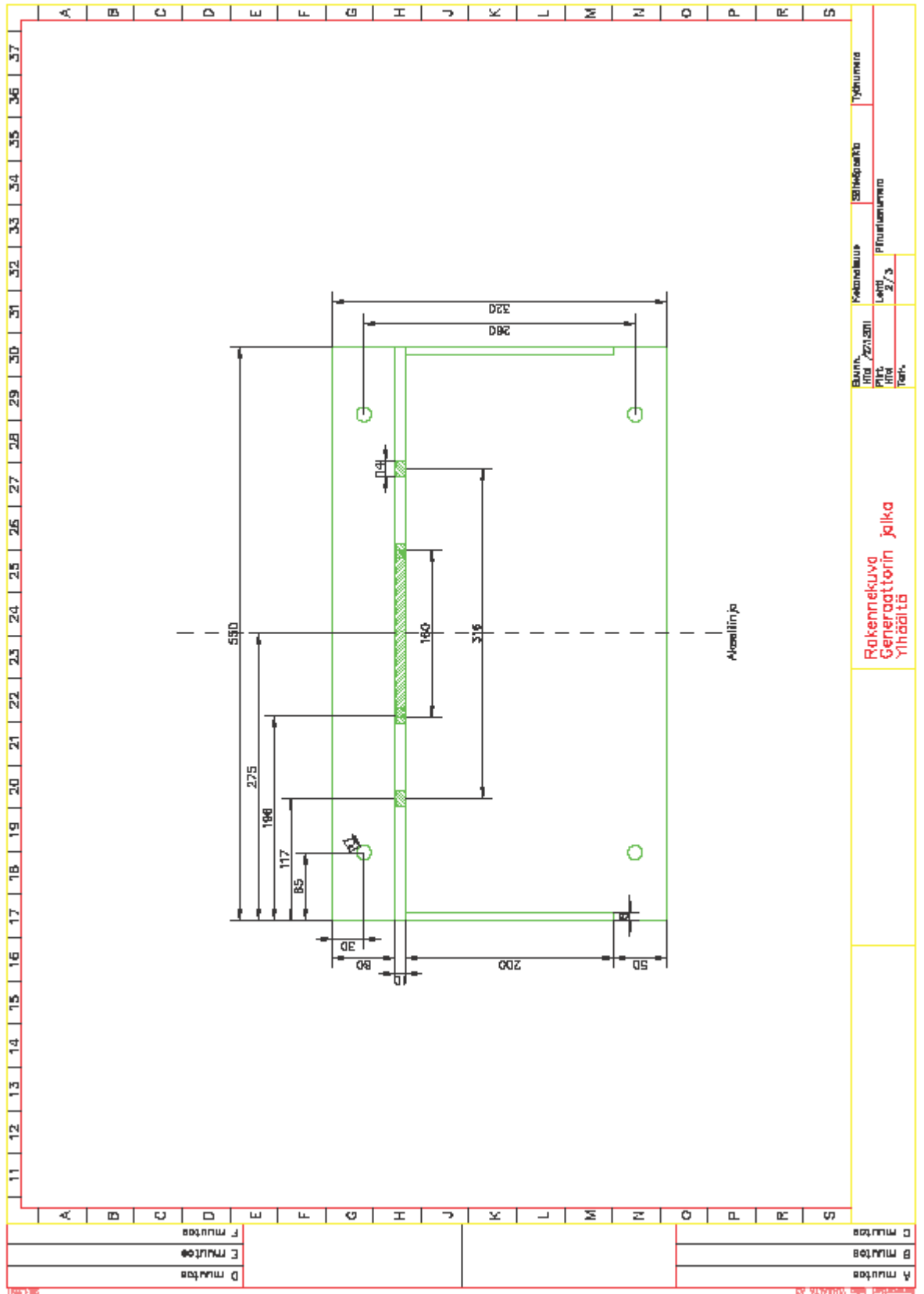


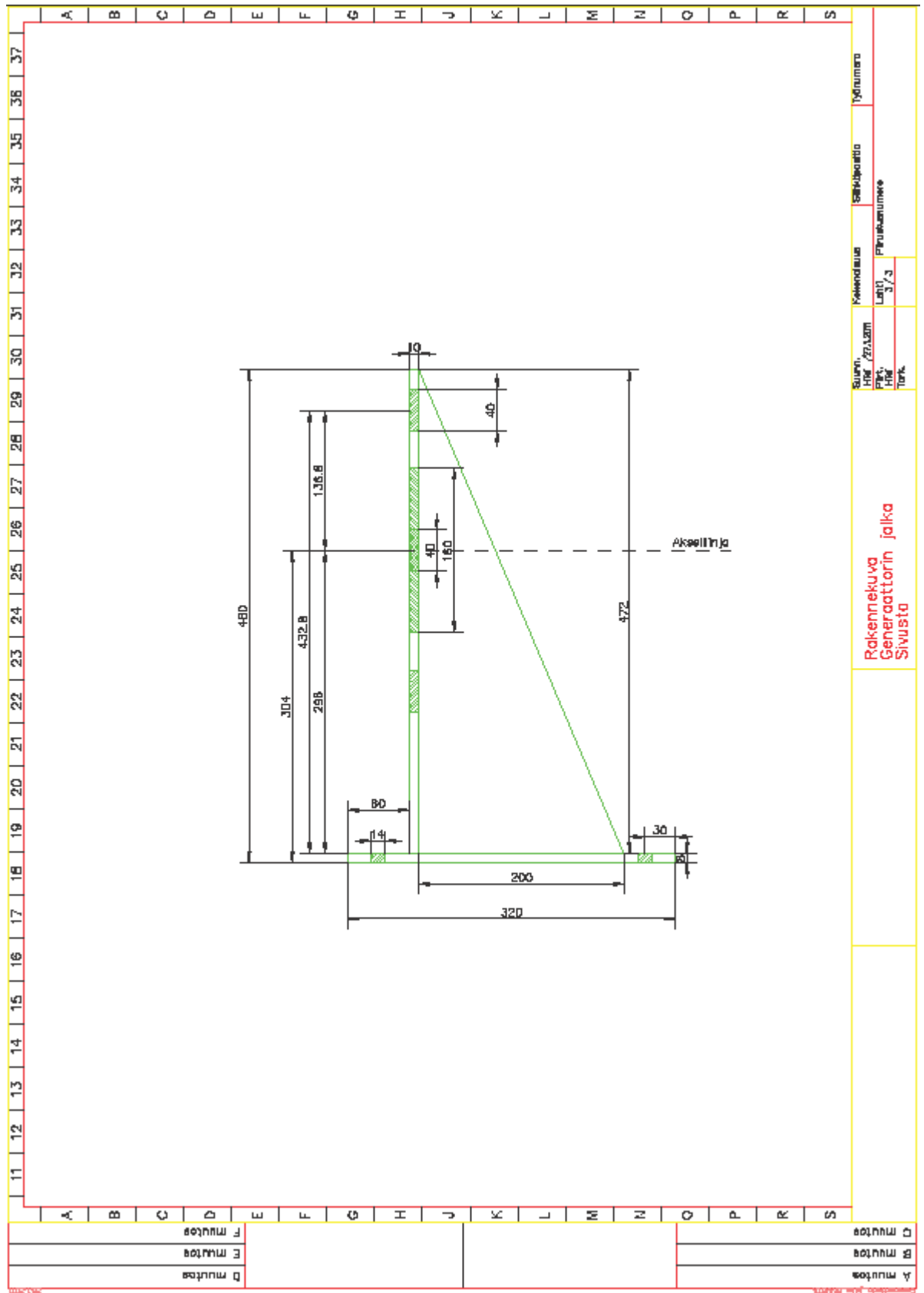












16.01.2010



AXCO AF-PM-2-D generators  
Models: PMG 3.0-250-A and PMG 2.0-250-P  
Technical Data Sheet

Permanent Magnet Generator for Distributed Wind Power Applications

■ AXCO-Motors Oy  
Laserkatu 6  
53850 Lappeenranta

■ TEL.: +358 (0) 5 624 3053  
Fax: +358 (0) 5 624 3054  
[www.axcomotors.com](http://www.axcomotors.com)

■ VAT-Code FI19377959

Subject to changes without notice



Models: PMG 3.0-250-A and PMG 2.0-250-P

2/6

16.01.2010

**Definitions**

This 3-phase AC permanent magnet generator (PMG) may be used to supply passive load such as diode-bridge or heating resistors. The machine type is denoted as PMG 2.0-250-P.

The same machine may be used with an active bridge towards the generator. In this case the maximum power output of the machine is increased and the same machine is denoted as PMG 3.0-250-A.

**Standards**

Generators meet the requirements of IEC 60034 with the relevant sections.

**Excitation system**

The generators are equipped with a permanent magnet (PM) excitation. PM excitation provides a fixed excitation for the machine.

Employed PM material is NdFeB. Permanent magnets are surface mounted on the surface of the rotor disk. Corrosion of the magnets, due to the atmospheric gases and humidity, is eliminated via a specific coating material employed for magnets surfaces.

**Windings and electrical performance**

Stator winding is a 3-phase double-layer concentrated winding. This eliminates effectively the harmonics in the voltage waveform and ensures, with the carefully designed pole profile, very low voltage waveform distortions and low torque ripple.

**Insulation and impregnation**

The insulation system is class 'F'.

All wound components are varnished.

Strengthened insulation system is used in order to ensure the safe operation in inverter usage.



Models: PMG 3.0-250-A and PMG 2.0-250-P

3/6

16.01.2010

**Electrical performance specification – PMG 2.0-250-P – parameters under passive loading**

The parameters of the generator.

Parameter	Explanation	Value	Dimension
$P$	Electric power	2.0	kW
$S$	Apparent power	2.0	kVA
$T$	Shaft torque	76	Nm
$n$	Rotation speed	250	min <sup>-1</sup>
$n_{max}$	Maximum allowed rotation speed under full loading	300	min <sup>-1</sup>
$n_{max}$	Maximum allowed rotation speed under no-load condition	500	min <sup>-1</sup>
$2p$	Number of pole-pairs	5	pcs.
$f$	Line frequency on rotation speed of 250 min <sup>-1</sup>	20.8	Hz
$E_{pm}$	PM excited no-load line-to-line voltage at speed 250 min <sup>-1</sup>	250	V
$U$	Line-to-line voltage (full load – passive loading)	155 <sup>1)</sup>	V
$I_{ph}$	Line current	7.6	A

1) Variation interval 0.95- $U$ ... 1.05- $U$  at rated point due to the variation of temperature.

Generator lumped parameters.

Parameter	Value	Dimension
$X_d$	15.7	Ohm
$X_q$	15.7	Ohm
$L_d$	0.12	H
$L_q$	0.12	H
$R_{ph}$	1.6	Ohm

**REMARKS:**

- The line current of the PMG must be limited to a value of 8.0 A.
- In the case of direct heating, current limit of 8.0 A requires load of which phase resistance  $R_{ph}$  is at least 15 Ohm or above.
- **It is denied to connect the generator directly to a grid!**



Models: PMG 3.0-250-A and PMG 2.0-250-P

4/6

16.01.2010

**Electrical performance specification – PMG 3.0-250-A – parameters under active loading**

The parameters of the generator.

Parameter	Explanation	Value	Dimension
$P$	Electric power	3.0	kW
$S$	Apparent power	3.1	kVA
$T$	Shaft torque	115	Nm
$n$	Rotation speed	250	min <sup>-1</sup>
$n_{max}$	Maximum allowed rotation speed under full loading	400 <sup>1)</sup>	min <sup>-1</sup>
$n_{max}$	Maximum allowed rotation speed under no-load condition	400 <sup>1)</sup>	min <sup>-1</sup>
$2p$	Number of pole-pairs	5	pcs.
$f$	Line frequency on rotation speed of 250 min <sup>-1</sup>	20.8	Hz
$E_{pm}$	PM excited no-load line-to-line voltage at speed 250 min <sup>-1</sup>	250	V
$U$	Line-to-line voltage (full load – active load)	250 <sup>2)</sup>	V
$I_{ph}$	Line current	7.2	A

1) Converter protection due to the over voltage is required if rotation speed of 400 min<sup>-1</sup> is exceeded.

2) Variation interval 0.95 · U... 1.05 · U at rated point due to the variation of temperature.

Generator lumped parameters.

Parameter	Value	Dimension
$X_d$	15.7	Ohm
$X_q$	15.7	Ohm
$L_d$	0.12	H
$L_q$	0.12	H
$R_{ph}$	1.6	Ohm
$X_d$	0.61	p.u.
$X_q$	0.61	p.u.
$R_{ph}$	0.07	p.u.

Generator may be loaded with a suitable frequency converter (active load for generator). Under this loading situation generator may produce continuous powers up to 3 kW. With the active load the shaft torque limitation is 120 Nm, up to speed of 400 min<sup>-1</sup>. If operation speed is over 400 min<sup>-1</sup>, the torque must be reduced by a factor 250/ $n$ .

**REMARKS:**

- Continuous value for the line current of the PMG must be limited to a value of 8.0 A
- **It is denied to connect the generator directly to a grid!**

Subject to changes without notice



Models: PMG 3.0-250-A and PMG 2.0-250-P

5/6

16.01.2010

**Electrical performance specification – No load**

No-load line voltage waveforms are illustrated in Fig 1.

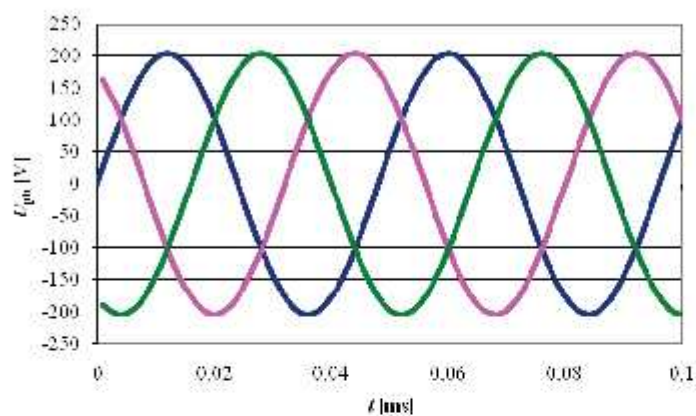


Fig 1. No-load voltage waveforms, rotation speed  $250 \text{ min}^{-1}$ .

**Electrical performance specification – Passive load**

Efficiency as a function of resistive load is shown in Fig 2.

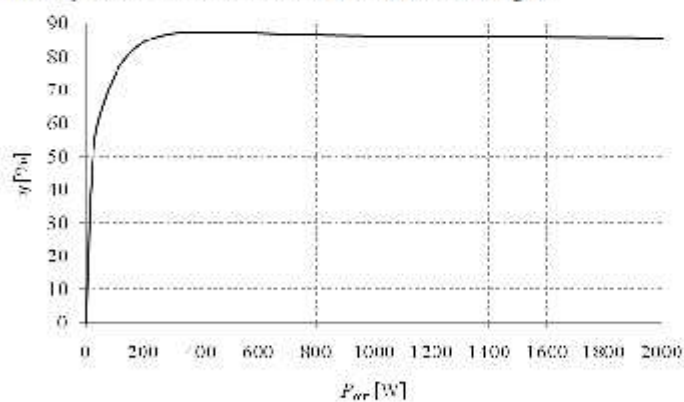


Fig 2. Efficiency of generator, Rotation speed is fixed  $250 \text{ min}^{-1}$ , employed load  $R_{ph} = 20 \text{ Ohm}$ .





Models: PMG 3.0-250-A and PMG 2.0-250-P

6/6

16.01.2010

Power as a function of phase voltage is presented in Fig 3.

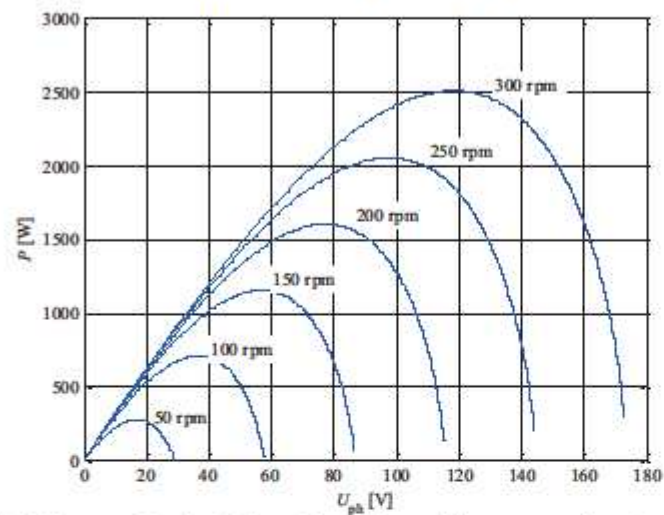


Fig 3. Power as a function of phase voltage. Characteristics curves may be used to optimize the generator loading for constructions where DC rectifier, equipped with a load control, is used against generator. (For example: By adjusting the converter DC bus voltage (converter load) to track generator and or turbine load curve optimum for different rotation speeds)

Power as a function of line resistance is presented in Fig 4.

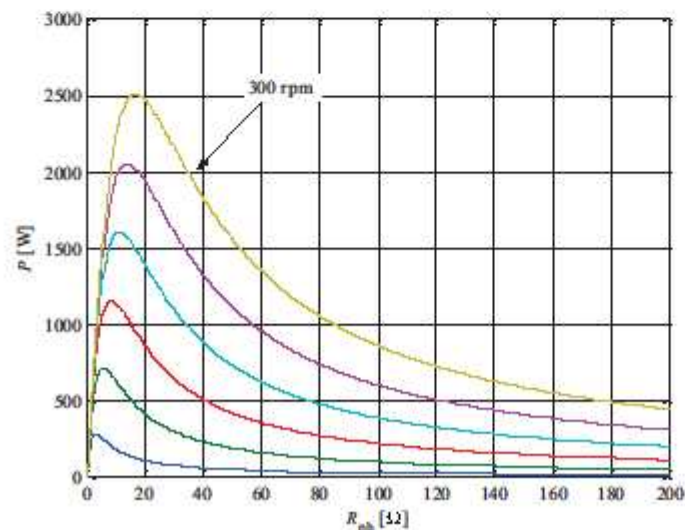


Fig 4. Power as a function of line resistance.

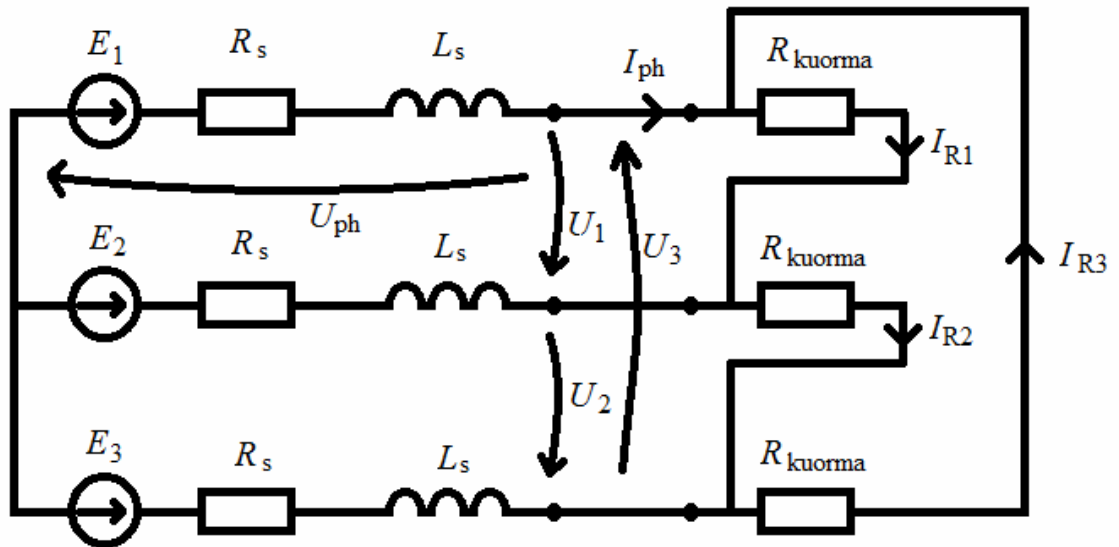
Subject to changes without notice

## LYHENTEET JA TERMIT

Näitä lyhenteitä on käytetty erityisesti liitteiden 5–8 taulukoissa.

$I_{\text{avg}}$	Generaattorilta kuormalle menevien vaihevirtojen keskiarvo
$I_{\text{gen}}$	Generaattorin kokonaisvaihevirta
$I_{\text{ph}}, I_{\text{ph1}}, I_{\text{ph2}}, I_{\text{ph3}}$	Generaattorilta kuormalle menevä vaihevirta
$I_{\text{R}}, I_{\text{R1}}, I_{\text{R2}}, I_{\text{R3}}$	Kolmiokytketyn kuorman yhden vastuksen virta
$P_{\text{DC}}$	DC teho
$P_{\text{ph avg}}$	Keskimääräinen vaiheteho
$P_{\text{tot}}$	Kolmivaiheteho, kokonaisteho
$\Delta P$	Kolmivaihetehon ja DC tehon erotus
$R_{1-2}, R_{2-3}, R_{3-1}$	Kahden staattorikäämin yli mitattu resistanssi
$R_{\text{avg}}$	Kahden staattorikäämin yli mitattujen resistanssien keskiarvo
$R_{\text{DC}}$	Tasasuuntaajan kuormaresistanssin arvo
$R_{\text{kuorma}}$	Kolmiokytketyn kuorman yhden vastuksen resistanssi
$R_{\text{ph}}$	Generaattorin näkemä resistanssi vaihetta kohti
$U_1, U_2, U_3$	Pääjännitteet
$U_{\text{avg}}$	Pääjännitteiden keskiarvo
$U_{\text{C}}$	Yhden kondensaattorin yli vaikuttava vaihejännite
$\eta_{\text{silta}}$	Diodisillan hyötysuhde

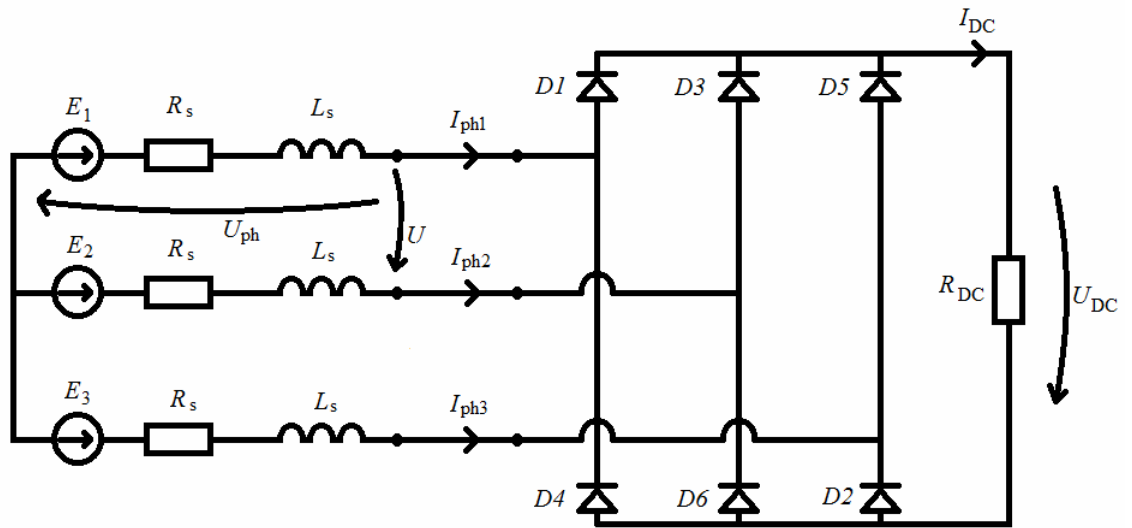
Resistiivisen kuorman mittauskytkentä ja -tulokset:



$n$	$U_1$	$U_2$	$U_3$	$U_{avg}$	$U_{ph}$	$I_{R1}$	$I_{R2}$	$I_{R3}$	$I_{Ravg}$	$I_{ph}$	$P_{ph\ avg}$	$P_{tot}$	$R_{ph}$	$R_{kuorma}$
rpm	V	V	V	V	V	A	A	A	A	A	W	W	$\Omega$	$\Omega$
300	283,2	281,1	283,9	282,7	163,2	0,52	0,51	0,51	0,51	0,89	145	435	184	551
300	281,1	279,8	282,7	281,2	162,4	0,67	0,65	0,65	0,66	1,14	184	553	143	429
300	280,6	278,6	281,8	280,3	161,9	0,71	0,70	0,71	0,71	1,22	198	594	132	397
300	280,0	277,4	280,7	279,4	161,3	0,77	0,77	0,77	0,77	1,33	215	644	121	364
300	278,4	276,3	279,5	278,1	160,5	0,86	0,85	0,85	0,85	1,48	237	711	109	326
300	277,4	275,2	277,8	276,8	159,8	0,95	0,94	0,94	0,94	1,63	261	783	98	294
300	272,3	271,6	273,9	272,6	157,4	1,20	1,18	1,16	1,18	2,04	322	965	77	231
300	270,5	268,9	271,7	270,4	156,1	1,33	1,31	1,30	1,31	2,27	355	1065	69	206
300	266,4	265,5	267,6	266,5	153,9	1,52	1,50	1,49	1,50	2,60	401	1202	59	177
300	261,3	260,9	261,9	261,4	150,9	1,75	1,71	1,71	1,72	2,98	450	1351	51	152
300	257,4	256,0	258,1	257,2	148,5	1,90	1,89	1,88	1,89	3,27	486	1458	45	136
300	252,4	251,7	253,8	252,6	145,9	2,07	2,05	2,04	2,05	3,56	519	1556	41	123
300	247,6	246,5	248,8	247,6	143,0	2,25	2,24	2,22	2,24	3,87	554	1662	37	111
300	244,1	243,3	245,0	244,1	141,0	2,37	2,36	2,34	2,36	4,08	575	1726	35	104
300	237,7	236,8	238,7	237,7	137,3	2,57	2,56	2,54	2,56	4,43	608	1823	31	93
300	227,8	227,2	228,8	227,9	131,6	2,86	2,85	2,83	2,85	4,93	649	1947	27	80
300	217,3	216,9	218,7	217,6	125,7	3,13	3,12	3,09	3,11	5,39	678	2033	23	70
300	202,5	202,3	203,7	202,8	117,1	3,48	3,47	3,43	3,46	5,99	702	2105	20	59
300	181,4	181,7	183,1	182,1	105,1	3,89	3,90	3,83	3,87	6,71	705	2116	16	47
300	159,8	160,0	161,4	160,4	92,6	4,28	4,26	4,20	4,25	7,36	681	2043	13	38
300	143,3	144,0	144,9	144,1	83,2	4,50	4,50	4,43	4,48	7,75	645	1935	11	32
300	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
250	235,5	234,3	236,5	235,4	135,9	0,43	0,43	0,43	0,43	0,74	101	302	184	551
250	234,1	232,7	234,4	233,7	134,9	0,60	0,60	0,60	0,60	1,03	140	419	131	392
250	232,8	231,3	233,2	232,4	134,2	0,71	0,70	0,70	0,70	1,21	163	488	111	332
250	231,5	229,9	231,5	231,0	133,3	0,80	0,80	0,80	0,80	1,39	185	555	96	288
250	229,4	228,5	230,0	229,3	132,4	0,95	0,94	0,93	0,94	1,63	216	647	81	244
250	226,3	224,9	226,9	226,0	130,5	1,15	1,15	1,15	1,15	1,99	260	779	66	197
250	221,8	220,8	222,4	221,7	128,0	1,41	1,40	1,40	1,40	2,42	310	930	53	158
250	217,9	216,3	217,7	217,3	125,5	1,65	1,64	1,64	1,64	2,85	357	1071	44	132
250	212,2	211,0	212,2	211,8	122,3	1,90	1,90	1,89	1,90	3,29	402	1205	37	112
250	206,4	205,2	206,9	206,2	119,0	2,16	2,15	2,14	2,15	3,72	443	1329	32	96
250	200,4	199,6	200,8	200,3	115,6	2,40	2,39	2,38	2,39	4,14	479	1436	28	84
250	193,3	192,4	193,6	193,1	111,5	2,65	2,65	2,63	2,64	4,57	510	1530	24	73
250	185,5	185,1	186,1	185,6	107,1	2,91	2,90	2,87	2,89	5,01	537	1611	21	64
250	177,5	177,1	177,9	177,5	102,5	3,17	3,15	3,12	3,15	5,45	558	1675	19	56
250	168,2	168,0	168,9	168,4	97,2	3,42	3,41	3,35	3,39	5,88	571	1714	17	50
250	158,2	157,8	158,8	158,3	91,4	3,66	3,66	3,61	3,64	6,31	576	1728	14	43
250	147,5	147,7	148,4	147,9	85,4	3,90	3,88	3,83	3,87	6,71	573	1718	13	38
250	134,4	135,0	135,8	135,1	78,0	4,15	4,14	4,05	4,11	7,13	556	1667	11	33
250	120,2	121,0	121,8	121,0	69,9	4,42	4,40	4,30	4,37	7,57	529	1587	9	28
250	105,6	107,1	108,0	106,9	61,7	4,67	4,63	4,51	4,60	7,97	492	1476	8	23
250	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
200	187,7	186,9	188,3	187,6	108,3	0,34	0,34	0,34	0,34	0,59	64	192	183	550
200	186,9	185,5	187,5	186,6	107,8	0,45	0,43	0,43	0,44	0,76	82	245	142	427
200	186,6	185,5	186,8	186,3	107,6	0,50	0,50	0,49	0,50	0,86	92	277	125	376
200	185,6	184,5	186,6	185,6	107,1	0,56	0,55	0,55	0,55	0,96	102	307	112	336
200	185,1	183,7	185,5	184,8	106,7	0,63	0,63	0,63	0,63	1,09	116	348	98	294
200	184,0	183,6	184,8	184,1	106,3	0,75	0,73	0,72	0,73	1,27	135	406	84	251
200	181,7	181,5	182,6	181,9	105,0	0,91	0,90	0,90	0,90	1,56	164	492	67	202
200	179,2	178,8	180,1	179,4	103,6	1,14	1,11	1,11	1,12	1,93	200	601	54	161
200	175,3	175,0	176,5	175,6	101,4	1,37	1,36	1,36	1,36	2,36	239	718	43	129
200	173,1	172,2	173,8	173,0	99,9	1,53	1,53	1,51	1,52	2,64	263	790	38	114
200	168,9	168,7	169,0	168,9	97,5	1,81	1,80	1,79	1,80	3,11	304	911	31	94
200	162,7	162,4	163,0	162,7	93,9	2,12	2,11	2,07	2,10	3,63	341	1024	26	78
200	155,2	155,0	156,1	155,4	89,7	2,49	2,47	2,43	2,46	4,26	383	1148	21	63
200	146,6	146,6	147,8	147,0	84,9	2,84	2,82	2,76	2,81	4,86	412	1237	17	52
200	138,2	138,6	139,2	138,7	80,1	3,14	3,13	3,08	3,11	5,39	432	1296	15	45
200	127,1	127,1	128,1	127,4	73,6	3,50	3,50	3,43	3,48	6,03	443	1330	12	37
200	117,4	118,0	118,9	118,1	68,2	3,78	3,78	3,68	3,75	6,49	443	1328	11	32
200	106,2	107,0	107,6	106,9	61,7	4,07	4,07	3,96	4,04	6,99	432	1295	9	26
200	89,9	90,6	91,5	90,7	52,3	4,44	4,45	4,31	4,40	7,62	399	1196	7	21
200	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

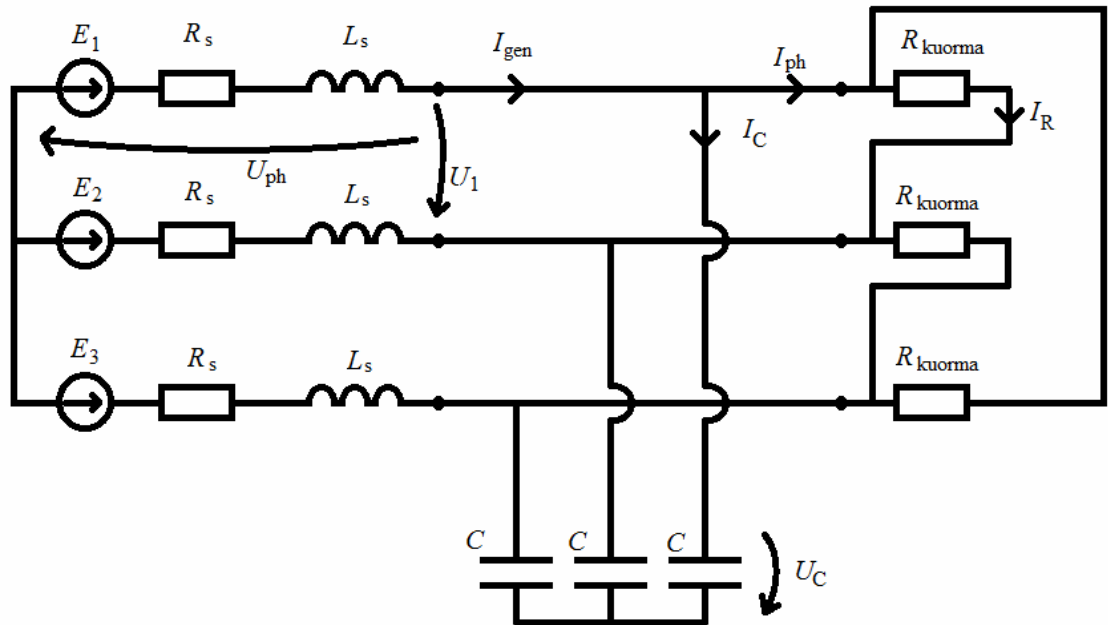
$n$	$U_1$	$U_2$	$U_3$	$U_{avg}$	$U_{ph}$	$I_{R1}$	$I_{R2}$	$I_{R3}$	$I_{R\,avg}$	$I_{ph}$	$P_{ph\,avg}$	$P_{tot}$	$R_{ph}$	$R_{kuorma}$
rpm	V	V	V	V	V	A	A	A	A	A	W	W	$\Omega$	$\Omega$
150	140,2	139,0	140,3	139,8	80,7	0,26	0,26	0,26	0,26	0,44	36	108	182	546
150	139,6	139,7	139,6	139,6	80,6	0,32	0,31	0,31	0,31	0,54	44	132	148	444
150	139,2	138,7	139,5	139,1	80,3	0,36	0,35	0,35	0,35	0,61	49	147	131	394
150	138,9	138,4	139,2	138,8	80,2	0,38	0,38	0,38	0,38	0,66	53	158	122	366
150	138,4	138,5	139,4	138,8	80,1	0,41	0,41	0,40	0,41	0,70	56	169	114	342
150	138,8	137,7	138,2	138,2	79,8	0,44	0,44	0,44	0,44	0,76	61	182	105	314
150	138,4	137,5	138,2	138,0	79,7	0,49	0,49	0,49	0,49	0,85	68	203	94	282
150	137,7	136,7	137,4	137,3	79,3	0,57	0,56	0,55	0,56	0,97	77	230	82	245
150	136,0	135,9	136,3	136,1	78,6	0,74	0,73	0,72	0,73	1,26	99	297	62	187
150	133,8	133,9	134,2	134,0	77,3	0,98	0,97	0,97	0,97	1,69	130	391	46	138
150	132,0	131,8	133,3	132,4	76,4	1,10	1,08	1,07	1,08	1,88	143	430	41	122
150	130,6	130,3	131,0	130,6	75,4	1,26	1,25	1,24	1,25	2,17	164	491	35	104
150	126,5	127,1	127,7	127,1	73,4	1,52	1,52	1,50	1,51	2,62	192	576	28	84
150	123,7	123,6	124,8	124,0	71,6	1,76	1,75	1,72	1,74	3,01	216	648	24	71
150	118,0	118,1	118,9	118,3	68,3	2,14	2,13	2,09	2,12	3,67	251	752	19	56
150	109,4	109,8	110,2	109,8	63,4	2,63	2,62	2,54	2,60	4,50	285	855	14	42
150	98,0	98,9	99,7	98,9	57,1	3,15	3,15	3,06	3,12	5,40	308	925	11	32
150	87,8	88,0	88,7	88,2	50,9	3,59	3,61	3,48	3,56	6,17	314	942	8	25
150	69,3	70,6	71,5	70,5	40,7	4,20	4,22	4,01	4,14	7,17	292	875	6	17
150	57,3	58,8	59,6	58,6	33,8	4,54	4,55	4,28	4,46	7,72	261	783	4	13
150	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
100	94,5	93,9	93,9	94,1	54,3	0,17	0,17	0,17	0,17	0,30	16	48	184	553
100	93,9	92,8	93,9	93,5	54,0	0,23	0,23	0,23	0,23	0,40	22	65	135	405
100	93,3	94,2	95,3	94,3	54,4	0,25	0,24	0,24	0,24	0,42	23	69	129	386
100	94,0	93,3	94,2	93,8	54,2	0,26	0,26	0,26	0,26	0,45	24	73	121	363
100	93,6	92,8	94,3	93,6	54,0	0,28	0,28	0,28	0,28	0,48	26	79	112	335
100	93,7	93,8	93,1	93,5	54,0	0,31	0,30	0,30	0,30	0,53	28	85	103	308
100	92,4	92,2	93,1	92,6	53,4	0,37	0,37	0,36	0,37	0,64	34	102	84	252
100	91,1	91,3	93,3	91,9	53,1	0,44	0,44	0,44	0,44	0,77	41	122	69	208
100	90,9	89,6	91,3	90,6	52,3	0,63	0,62	0,61	0,62	1,07	56	168	49	146
100	89,6	88,9	92,0	90,2	52,1	0,73	0,72	0,72	0,72	1,25	65	196	42	125
100	88,9	88,0	89,7	88,9	51,3	0,85	0,84	0,84	0,85	1,46	75	225	35	105
100	86,8	87,9	87,4	87,4	50,4	1,05	1,03	1,03	1,03	1,79	90	271	28	84
100	85,2	84,2	86,1	85,2	49,2	1,26	1,25	1,23	1,25	2,16	106	319	23	68
100	82,6	82,4	82,6	82,5	47,7	1,55	1,53	1,51	1,53	2,65	126	378	18	54
100	78,1	78,4	79,9	78,8	45,5	1,89	1,85	1,82	1,85	3,21	146	438	14	43
100	74,5	75,4	76,0	75,3	43,5	2,19	2,16	2,11	2,15	3,73	162	486	12	35
100	69,5	69,6	70,4	69,8	40,3	2,60	2,59	2,49	2,56	4,43	179	536	9	27
100	59,0	60,5	61,0	60,2	34,7	3,17	3,19	3,02	3,12	5,41	188	564	6	19
100	47,6	49,1	49,4	48,7	28,1	3,82	3,80	3,53	3,72	6,44	181	543	4	13
100	31,6	34,1	34,7	33,5	19,3	4,53	4,52	4,05	4,37	7,57	146	439	3	8
100	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Diodisillan mittauskytkentä ja -tulokset:



n	U	U <sub>ph</sub>	I <sub>ph1</sub>	I <sub>ph2</sub>	I <sub>ph3</sub>	I <sub>avg</sub>	R <sub>ph</sub>	P <sub>ph,avg</sub>	P <sub>tot</sub>	U <sub>DC</sub>	I <sub>DC</sub>	R <sub>DC</sub>	P <sub>DC</sub>	ΔP	η <sub>sita</sub>
rpm	V	V	A	A	A	A	Ω	W	W	V	A	Ω	W	W	
300	270.0	155.9	2.02	1.99	2.00	2.00	78	541	937	339.9	2.49	137	846	91	0.90
300	266.8	154.0	2.26	2.23	2.24	2.24	69	598	1036	333.6	2.80	119	935	100	0.90
300	263.7	152.2	2.46	2.44	2.45	2.45	62	646	1119	328.2	3.08	106	1012	107	0.90
300	259.4	149.8	2.76	2.73	2.75	2.75	55	712	1234	321.2	3.48	92	1118	116	0.91
300	249.6	144.1	3.40	3.36	3.38	3.38	43	844	1461	306.2	4.35	70	1331	130	0.91
300	244.1	140.9	3.73	3.37	3.72	3.60	39	880	1524	298.4	4.81	62	1434	90	0.94
300	238.3	137.6	4.10	4.05	4.07	4.07	34	970	1680	289.8	5.30	55	1536	144	0.91
300	228.2	131.8	4.63	4.59	4.62	4.61	29	1053	1823	277.1	6.06	46	1679	144	0.92
300	216.8	125.2	5.20	5.15	5.18	5.18	24	1123	1944	262.6	6.85	38	1797	147	0.92
300	198.8	114.8	5.99	5.94	5.96	5.97	19	1186	2055	240.4	7.96	30	1912	142	0.93
300	175.0	101.0	6.86	6.82	6.82	6.83	15	1196	2071	210.7	9.16	23	1931	140	0.93
300	155.3	89.7	7.44	7.39	7.40	7.41	12	1151	1993	187.0	9.96	19	1863	130	0.93
300	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
250	228.4	131.9	1.72	1.70	1.71	1.71	77	391	677	289.8	2.12	137	615	63	0.91
250	226.2	130.6	1.90	1.86	1.88	1.88	70	425	735	286.5	2.33	123	668	67	0.91
250	224.6	129.7	2.06	2.04	2.05	2.05	63	460	797	282.0	2.57	110	724	73	0.91
250	222.1	128.2	2.28	2.25	2.27	2.27	57	503	872	277.3	2.86	97	792	80	0.91
250	217.3	125.5	2.65	2.62	2.64	2.64	48	573	992	269.3	3.35	80	903	89	0.91
250	212.5	122.7	3.05	3.02	3.04	3.03	40	645	1116	261.4	3.88	67	1014	102	0.91
250	208	120.1	3.40	3.36	3.39	3.38	36	703	1218	254.4	4.37	58	1111	107	0.91
250	203.6	117.5	3.72	3.67	3.69	3.69	32	752	1302	241.9	4.79	51	1159	144	0.89
250	193.8	111.9	4.38	4.33	4.36	4.36	26	844	1462	234.9	5.73	41	1345	117	0.92
250	181.2	104.6	5.12	5.08	5.09	5.10	21	924	1600	219.4	6.75	32	1482	118	0.93
250	166.3	96.0	5.91	5.87	5.87	5.88	16	978	1694	200.6	7.86	26	1576	117	0.93
250	147.7	85.3	6.70	6.66	6.68	6.68	13	987	1709	177.8	8.99	20	1598	112	0.93
250	123.6	71.4	7.56	7.54	7.54	7.55	9	933	1615	148.1	10.17	15	1506	109	0.93
250	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
200	185.8	107.3	1.42	1.41	1.41	1.41	76	263	455	238.1	1.74	137	413	41	0.91
200	181.2	104.6	1.91	1.89	1.90	1.90	55	344	596	228.6	2.37	96	542	54	0.91
200	180.0	103.9	2.07	2.05	2.06	2.06	50	371	643	225.7	2.60	87	586	57	0.91
200	177.8	102.7	2.29	2.27	2.28	2.28	45	406	703	221.6	2.88	77	638	65	0.91
200	173.1	99.9	2.72	2.69	2.71	2.71	37	469	812	214.1	3.46	62	741	70	0.91
200	170.2	98.3	3.02	2.98	3.00	3.00	33	510	884	208.9	3.86	54	807	77	0.91
200	166.9	96.4	3.28	3.25	3.26	3.26	30	545	943	204.3	4.21	49	860	83	0.91
200	162.6	93.9	3.69	3.66	3.69	3.68	26	599	1037	197.7	4.80	41	949	88	0.91
200	153.9	88.9	4.39	4.34	4.37	4.37	20	672	1164	186.1	5.75	32	1071	93	0.92
200	143.2	82.7	5.14	5.11	5.13	5.13	16	734	1272	172.9	6.83	25	1180	92	0.93
200	130.6	75.4	5.97	5.93	5.94	5.95	13	777	1345	156.7	7.97	20	1249	96	0.93
200	119.8	69.2	6.54	6.50	6.51	6.52	11	781	1352	143.7	8.77	16	1260	92	0.93
200	109.6	63.3	7.01	6.97	6.97	6.98	9	765	1325	131.5	9.41	14	1237	88	0.93
200	101.7	58.7	7.34	7.31	7.31	7.32	8	744	1289	121.5	9.87	12	1199	90	0.93
200	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
150	138.6	80.0	1.08	1.07	1.07	1.07	75	149	258	180.2	1.32	137	237	21	0.92
150	137.7	79.5	1.26	1.25	1.26	1.26	63	173	300	177.3	1.55	115	274	26	0.91
150	136.8	79.0	1.34	1.33	1.34	1.34	59	183	317	175.7	1.65	107	289	28	0.91
150	135.8	78.4	1.52	1.52	1.51	1.52	52	206	357	173.0	1.88	92	325	32	0.91
150	133.6	77.1	1.79	1.78	1.78	1.78	43	238	413	169.2	2.23	76	377	36	0.91
150	131.7	76.0	2.09	2.09	2.08	2.09	36	275	476	164.3	2.63	63	432	44	0.91
150	129.3	74.7	2.39	2.38	2.40	2.39	31	309	535	160.5	3.03	53	486	50	0.91
150	125.3	72.3	2.80	2.82	2.81	2.81	26	352	610	154.2	3.59	43	553	57	0.91
150	119.8	69.2	3.40	3.41	3.42	3.41	20	409	708	146.2	4.43	33	647	61	0.91
150	114.2	65.9	4.07	4.03	4.05	4.05	16	463	801	137.7	5.31	26	731	70	0.91
150	107.5	62.1	4.71	4.71	4.71	4.71	13	506	877	129.0	6.20	21	800	77	0.91
150	99	57.2	5.41	5.37	5.38	5.39	11	533	924	118.3	7.22	16	854	69	0.92
150	88.1	50.9	6.20	6.20	6.20	6.20	8	546	946	105.3	8.33	13	877	69	0.93
150	78.1	45.1	6.82	6.77	6.79	6.79	7	531	919	93.1	9.19	10	856	63	0.93
150	69.2	40.0	7.30	7.26	7.25	7.27	5	503	871	82.2	9.74	8	801	71	0.92
150	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
100	91.6	52.9	0.73	0.73	0.72	0.73	73	66	115	120.7	0.89	136	107	8	0.93
100	92.5	53.4	0.89	0.88	0.89	0.89	60	82	142	119.1	1.10	108	131	11	0.92
100	91.2	52.7	1.10	1.09	1.10	1.10	48	100	173	116.5	1.37	85	159	14	0.92
100	89.8	51.8	1.26	1.25	1.25	1.25	41	112	195	114.8	1.56	74	179	16	0.92
100	88	50.8	1.48	1.46	1.47	1.47	35	129	224	112.1	1.85	61	207	17	0.93
100	87.4	50.5	1.74	1.73	1.73	1.73	29	152	262	109.1	2.19	50	239	23	0.91
100	85.5	49.4	2.05	2.03	2.03	2.04	24	174	302	105.8	2.61	41	276	26	0.91
100	83.6	48.3	2.37	2.35	2.38	2.37	20	198	343	102.2	3.03	34	309	33	0.90
100	78.5	45.3	3.11	3.09	3.11	3.10	15	244	422	94.4	4.03	23	381	41	0.90
100	72.3	41.7	3.83	3.77	3.78	3.79	11	274	475	87.1	5.04	17	439	36	0.92
100	66.6	38.5	4.55	4.55	4.54	4.55	8	303	524	79.4	6.11	13	485	40	0.92
100	60.7	35.0	5.26	5.21	5.22	5.23	7	317	550	72.0	7.05	10	508	42	0.92
100	53	30.6	5.99	5.97	5.96	5.97	5	317	548	62.7	8.10	8	508	40	0.93
100	44.8	25.9	6.61	6.71	6.74	6.69	4	300	519	52.1	9.13	6	475	43	0.92
100	36.1	20.8	7.34	7.35	7.36	7.35	3	265	460	41.5	9.99	4	415	45	0.90
100	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Kapasitansseilla varustetun resistiivisen kuorman mittauskytkentä ja -tulokset:

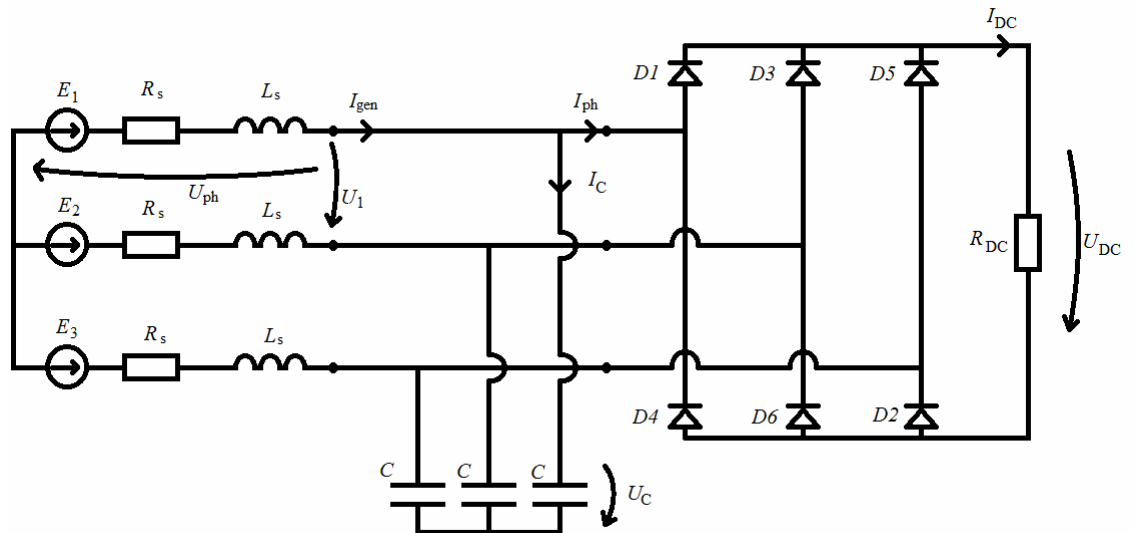




C = 59,68 μF											=I <sub>ph</sub> + I <sub>c</sub>
n	U <sub>1</sub>	U <sub>ph</sub>	I <sub>ph</sub>	I <sub>R</sub>	P <sub>tot</sub>	R <sub>ph</sub>	R <sub>kuorma</sub>	U <sub>C</sub>	I <sub>C</sub>	Q <sub>C</sub>	I <sub>gen</sub>
rpm	V	V	A	A	W	Ω	Ω	V	A	Var	A
400	388,7	224,4	5,33	3,08	3595	42	126	227,3	2,83	1927	6,01
400	379,8	219,3	5,53	3,20	3648	40	119	221,9	2,76	1837	6,16
400	355,2	205,1	6,05	3,51	3735	34	101	207,8	2,58	1610	6,55
400	342,8	197,9	6,29	3,63	3735	31	94	201,3	2,50	1510	6,72
400	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
350	392,5	226,6	1,96	1,13	1327	116	348	229,0	2,48	1704	3,15
350	387,5	223,7	2,24	1,29	1502	100	300	226,2	2,45	1662	3,31
350	381,7	220,4	2,54	1,49	1711	87	256	222,5	2,41	1608	3,49
350	370,9	214,1	3,12	1,81	2013	69	205	216,7	2,35	1529	3,89
350	351,7	203,1	3,94	2,32	2443	52	152	205,4	2,23	1373	4,49
350	334,7	193,2	4,59	2,65	2665	42	126	196,0	2,12	1249	5,02
350	323,7	186,9	4,95	2,86	2780	38	113	189,9	2,06	1172	5,32
350	313,3	180,9	5,26	3,05	2867	34	103	183,8	1,99	1097	5,60
350	295,6	170,7	5,77	3,34	2963	30	88	173,3	1,88	979	6,05
350	272,5	157,3	6,35	3,67	3001	25	74	159,8	1,74	832	6,57
350	240,6	138,9	7,03	4,08	2943	20	59	141,4	1,53	650	7,18
350	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
300	330,5	190,8	1,04	0,60	595	183	551	192,1	1,79	1030	2,07
300	325,6	188,0	1,39	0,80	780	135	407	190,8	1,78	1016	2,24
300	323,4	186,7	1,59	0,92	889	117	353	189,1	1,76	1000	2,37
300	321,2	185,4	1,84	1,06	1019	101	304	187,2	1,75	980	2,53
300	314,3	181,5	2,33	1,36	1280	78	231	183,2	1,71	938	2,86
300	304,2	175,7	3,05	1,78	1626	58	171	176,9	1,65	876	3,46
300	291,7	168,4	3,69	2,14	1868	46	137	170,9	1,59	815	4,00
300	281,5	162,5	4,23	2,44	2060	38	115	164,2	1,53	753	4,47
300	268,4	155,0	4,76	2,75	2217	33	98	157,4	1,47	692	4,97
300	251,6	145,2	5,42	3,13	2361	27	80	147,4	1,37	608	5,59
300	228,3	131,8	6,18	3,58	2449	21	64	134,2	1,25	503	6,29
300	194,4	112,2	7,07	4,11	2395	16	47	114,8	1,07	368	7,15
300	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
250	264,1	152,5	0,83	0,48	381	183	549	154,5	1,20	556	1,46
250	262,4	151,5	1,08	0,63	497	140	416	153,1	1,19	547	1,61
250	260,8	150,6	1,29	0,75	583	117	350	152,8	1,18	542	1,75
250	259,1	149,6	1,46	0,84	655	102	307	151,2	1,18	534	1,88
250	254,0	146,7	1,93	1,12	854	76	227	148,9	1,16	517	2,25
250	245,4	141,7	2,69	1,58	1166	53	155	143,3	1,11	476	2,91
250	236,9	136,8	3,35	1,94	1380	41	122	138,7	1,08	449	3,51
250	228,8	132,1	3,89	2,25	1545	34	102	133,6	1,04	416	4,02
250	216,6	125,0	4,56	2,64	1714	27	82	127,1	0,99	376	4,66
250	200,4	115,7	5,36	3,10	1863	22	65	117,8	0,91	323	5,42
250	180,2	104,0	6,17	3,58	1937	17	50	106,3	0,83	264	6,22
250	159,9	92,3	6,88	3,99	1911	13	40	94,7	0,74	209	6,92
250	149,8	86,5	7,18	4,16	1870	12	36	89,0	0,69	185	7,21
250	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

C = 59,68 μF											=I <sub>ph</sub> + I <sub>c</sub>
<i>n</i>	<i>U</i> <sub>1</sub>	<i>U</i> <sub>ph</sub>	<i>I</i> <sub>ph</sub>	<i>I</i> <sub>R</sub>	<i>P</i> <sub>tot</sub>	<i>R</i> <sub>ph</sub>	<i>R</i> <sub>kuorma</sub>	<i>U</i> <sub>C</sub>	<i>I</i> <sub>C</sub>	<i>Q</i> <sub>C</sub>	<i>I</i> <sub>gen</sub>
rpm	V	V	A	A	W	Ω	Ω	V	A	Var	A
200	204,6	118,1	0,65	0,37	228	183	550	119,5	0,74	267	0,99
200	203,4	117,4	0,87	0,50	304	136	408	118,9	0,74	264	1,14
200	202,2	116,7	1,05	0,60	365	112	336	118,2	0,73	260	1,27
200	200,5	115,8	1,26	0,73	437	92	276	117,8	0,73	258	1,45
200	196,8	113,6	1,79	1,05	617	64	188	115,0	0,71	246	1,92
200	191,2	110,4	2,41	1,39	799	46	137	112,1	0,70	234	2,50
200	187,5	108,2	2,82	1,62	913	38	116	109,6	0,68	223	2,89
200	180,5	104,2	3,40	1,97	1065	31	92	106,0	0,66	210	3,47
200	173,5	100,2	3,96	2,29	1191	25	76	102,0	0,64	194	4,01
200	166,3	96,0	4,49	2,60	1295	21	64	97,7	0,61	178	4,52
200	149,7	86,4	5,47	3,16	1419	16	47	88,5	0,55	146	5,49
200	128,3	74,1	6,55	3,78	1457	11	34	76,1	0,47	108	6,57
200	111,7	64,5	7,20	4,17	1397	9	27	66,6	0,41	83	7,22
200	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
150	150,6	86,9	0,47	0,28	124	184	548	87,1	0,41	106	0,62
150	148,4	85,7	0,65	0,37	166	133	398	87,2	0,41	106	0,78
150	148,0	85,4	0,78	0,45	200	109	328	86,5	0,41	105	0,89
150	147,8	85,3	1,00	0,58	257	85	255	85,9	0,40	104	1,07
150	143,8	83,0	1,56	0,89	385	53	161	84,0	0,39	98	1,60
150	140,8	81,3	1,94	1,12	474	42	125	83,0	0,39	96	1,97
150	138,4	79,9	2,31	1,33	554	35	104	81,1	0,38	92	2,33
150	134,4	77,6	2,78	1,61	648	28	84	79,1	0,37	87	2,80
150	129,3	74,7	3,41	1,97	766	22	66	76,1	0,35	81	3,44
150	122,7	70,8	4,01	2,32	855	18	53	72,6	0,34	74	4,01
150	110,7	63,9	5,04	2,91	968	13	38	65,9	0,31	60	5,03
150	97,0	56,0	6,01	3,47	1009	9	28	58,2	0,27	47	6,03
150	82,7	47,8	6,79	3,96	984	7	21	50,0	0,23	35	6,80
150	75,2	43,4	7,18	4,20	947	6	18	45,6	0,21	29	7,21
150	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
100	98,5	56,9	0,31	0,18	53	183	553	57,1	0,18	30	0,36
100	97,2	56,1	0,44	0,26	74	126	381	57,2	0,18	30	0,48
100	96,4	55,6	0,54	0,31	90	103	311	56,8	0,18	30	0,57
100	95,5	55,1	0,73	0,42	120	75	227	56,4	0,18	30	0,75
100	94,3	54,4	1,11	0,65	183	49	145	55,4	0,17	29	1,11
100	92,5	53,4	1,32	0,77	213	40	120	55,0	0,17	28	1,34
100	92,0	53,1	1,55	0,91	250	34	102	53,7	0,17	27	1,56
100	88,8	51,3	2,00	1,16	308	26	77	52,3	0,16	26	2,02
100	86,0	49,7	2,51	1,44	372	20	60	51,6	0,16	25	2,51
100	80,3	46,4	3,41	1,97	474	14	41	47,5	0,15	21	3,40
100	75,4	43,5	3,99	2,32	524	11	33	45,7	0,14	19	4,02
100	69,5	40,1	4,73	2,75	573	8	25	41,4	0,13	16	4,75
100	60,3	34,8	5,66	3,26	590	6	18	36,7	0,11	13	5,57
100	42,1	24,3	7,09	4,18	528	3	10	26,4	0,08	7	7,17
100	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Kapasitansseilla varustetun diodisiltakytkennän mittauskytkentä ja -tulokset:



C = 59.68 $\mu$ F								= $I_{ph} + I_C$						
$n$	$U_1$	$U_{ph}$	$I_{ph}$	$U_{dc}$	$I_{dc}$	$U_C$	$I_C$	$I_{gen}$	$R_{ph}$	$R_{DC}$	$P_{tot}$	$P_{DC}$	$\Delta P$	$\eta$
rpm	V	V	A	V	A	V	A	A	$\Omega$	ohm	W	W	W	
300	324,3	187,2	2,87	426,4	3,19	189,0	2,02	3,36	65	134	1609	1360	249	0,85
300	322,8	186,4	3,12	421,8	3,72	188,2	2,09	3,76	60	113	1744	1571	174	0,90
300	321,6	185,7	3,62	415,7	4,36	187,7	2,18	4,23	51	95	2018	1811	207	0,90
300	316,7	182,8	4,16	407,3	5,05	184,6	2,24	4,73	44	81	2283	2055	228	0,90
300	312,0	180,1	4,57	399,2	5,57	181,8	2,26	5,10	39	72	2468	2222	246	0,90
300	302,8	174,8	5,11	386,3	6,32	176,9	2,27	5,59	34	61	2680	2439	241	0,91
300	293,8	169,6	5,59	372,0	6,94	171,2	2,26	6,04	30	54	2844	2583	261	0,91
300	273,1	157,7	6,35	344,5	8,01	159,5	2,19	6,72	25	43	3005	2758	247	0,92
300	255,2	147,3	6,87	321,4	8,74	149,1	2,09	7,20	21	37	3038	2809	229	0,92
300	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
250	264,0	152,4	1,94	343,9	2,30	154,1	1,44	2,41	79	150	886	791	95	0,89
250	263,0	151,8	2,67	336,8	3,23	153,2	1,57	3,14	57	104	1218	1089	129	0,89
250	258,7	149,3	3,31	328,6	4,07	150,8	1,63	3,71	45	81	1484	1338	147	0,90
250	255,2	147,3	3,63	324,0	4,53	148,9	1,63	4,02	41	72	1603	1467	136	0,91
250	249,6	144,1	4,09	316,7	5,14	146,0	1,65	4,41	35	62	1769	1628	141	0,92
250	237,3	137,0	4,92	299,0	6,27	138,4	1,63	5,20	28	48	2022	1875	147	0,93
250	226,8	130,9	5,46	284,9	7,01	132,6	1,59	5,69	24	41	2143	1998	145	0,93
250	211,4	122,1	6,13	264,2	7,94	123,3	1,53	6,33	20	33	2246	2099	147	0,93
250	184,5	106,5	7,05	229,7	9,21	107,8	1,41	7,19	15	25	2253	2115	138	0,94
250	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
200	205,1	118,4	1,56	259,7	1,90	118,9	1,01	1,87	76	136	554	494	60	0,89
200	202,0	116,6	2,11	255,1	2,64	117,8	1,05	2,36	55	97	738	674	64	0,91
200	196,8	113,6	2,87	246,6	3,66	114,9	1,08	3,08	40	67	978	902	76	0,92
200	194,4	112,2	3,15	243,4	4,05	113,2	1,08	3,33	36	60	1062	985	77	0,93
200	189,9	109,6	3,58	237,2	4,62	111,0	1,08	3,75	31	51	1178	1097	82	0,93
200	183,3	105,8	4,15	229,1	5,38	107,3	1,07	4,29	26	43	1317	1232	85	0,94
200	176,5	101,9	4,70	220,1	6,13	103,1	1,05	4,82	22	36	1437	1350	87	0,94
200	165,6	95,6	5,38	206,1	7,05	96,7	1,03	5,48	18	29	1542	1452	89	0,94
200	154,8	89,4	5,95	192,5	7,85	90,8	0,99	6,04	15	25	1596	1512	84	0,95
200	140,9	81,3	6,59	174,6	8,73	82,9	0,94	6,67	12	20	1607	1523	84	0,95
200	126,8	73,2	7,14	156,1	9,49	74,5	0,88	7,20	10	16	1568	1482	86	0,95
200	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
150	147,0	84,9	1,07	185,1	1,35	85,7	0,60	1,22	79	137	273	250	22	0,92
150	145,6	84,1	1,23	184,5	1,57	85,3	0,60	1,37	69	118	309	289	21	0,93
150	144,5	83,4	1,64	180,9	2,10	84,2	0,61	1,75	51	86	409	380	30	0,93
150	142,0	82,0	2,02	177,7	2,64	83,1	0,63	2,12	41	67	497	470	28	0,94
150	141,0	81,4	2,32	176,3	3,01	82,1	0,63	2,40	35	59	565	531	34	0,94
150	138,5	80,0	2,59	173,0	3,39	81,0	0,64	2,67	31	51	621	586	35	0,94
150	134,4	77,6	3,15	167,3	4,17	78,8	0,64	3,25	25	40	734	698	36	0,95
150	130,6	75,4	3,62	163,1	4,78	76,9	0,64	3,67	21	34	819	779	40	0,95
150	124,6	71,9	4,22	154,9	5,62	73,4	0,63	4,27	17	28	910	871	39	0,96
150	116,3	67,1	5,02	143,4	6,68	68,5	0,61	5,05	13	21	1011	958	52	0,95
150	108,4	62,6	5,58	133,2	7,51	63,7	0,59	5,65	11	18	1048	1001	48	0,95
150	98,4	56,8	6,21	120,6	8,37	58,2	0,56	6,25	9	14	1058	1010	48	0,95
150	82,7	47,7	7,08	100,4	9,55	49,0	0,50	7,15	7	11	1014	959	55	0,95
150	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
100	93,6	54,1	0,73	121,6	0,89	55,5	0,29	0,79	74	137	119	108	11	0,91
100	93,8	54,1	0,93	118,6	1,14	54,6	0,30	0,97	59	104	150	135	15	0,90
100	92,1	53,2	1,27	115,3	1,59	54,3	0,31	1,30	42	73	202	183	19	0,91
100	90,8	52,4	1,42	114,8	1,81	54,0	0,31	1,45	37	63	224	208	16	0,93
100	90,9	52,5	1,62	112,9	2,09	53,4	0,32	1,64	32	54	256	236	20	0,92
100	89,3	51,5	1,83	111,5	2,38	52,7	0,32	2,37	28	47	283	265	18	0,94
100	88,4	51,0	2,04	110,2	2,66	52,3	0,32	2,05	25	41	313	292	20	0,94
100	87,6	50,6	2,29	108,0	3,04	51,4	0,32	2,32	22	36	347	328	19	0,95
100	84,1	48,6	2,73	104,4	3,63	50,0	0,32	2,74	18	29	397	379	18	0,95
100	81,2	46,9	3,16	101,0	4,22	48,8	0,32	3,17	15	24	444	427	17	0,96
100	72,9	42,1	4,38	89,2	5,89	43,4	0,31	4,38	10	15	553	525	27	0,95
100	63,0	36,4	5,42	77,0	7,32	37,8	0,29	5,46	7	11	591	564	27	0,95
100	51,7	29,8	6,41	62,5	8,74	31,1	0,25	6,40	5	7	574	546	27	0,95
100	41,1	23,7	7,16	49,2	9,76	24,9	0,22	7,21	3	5	509	480	29	0,94
100	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0